

長尺鋼管杭の打撃ひずみ波形解析

柴田 徹・関口 秀雄
松本 樹典・北 勝利

ANALYSIS OF THE RECORDED STRAIN WAVEFORMS IN OFFSHORE STEEL PIPE PILES

By Toru SHIBATA, Hideo SEKIGUCHI,
Tatsunori MATSUMOTO and Katsutoshi KITA

Synopsis

This paper is concerned with the wave-equation assessment of the drivability of a large-diameter, open-ended steel pipe pile that was actually driven, by means of a diesel hammer, deep into the deposit of alluvial and pleistocene clays. The analysis procedure makes full use of the theory of one-dimensional elastic wave-propagation, and is specifically based on the two-point strain-gauge method. Close examination is first made of all the strain waveforms available for a single blow of the hammer at the final stage of pile penetration into the thin layer of dense sand. The analysis clearly shows that the propagation of the strain waves obey the theory of elastic wave-propagation, along with the wave velocity of 5200 m being identified. The analysis also shows that the sharp decay in the peak amplitude of the strain waveforms observed in the lower 4 meters of the pile is due to the reflection of the pre-cursing waves at the pile tip as the tension waves. The two-point strain-gauge method is then applied to predicting the displacement of the pile head as a function of time during a single blow of the hammer, and the results are shown to compare favourably with what was measured on the site using a manually tracing technique. Furthermore, the application of the two-point strain-gauge method reveals the real efficiency of driving to be as low as 0.22, compared with the commonly assumed value of 0.5. It is noteworthy that the real efficiency of 0.22 when combined with Hiley's formula resolves significantly the reported over-estimation of the bearing capacity of the pile in terms of Hiley's formula with the assumed driving efficiency of 0.5.

1. 緒 言

従来より杭打設に伴う施工管理の一環として、各打撃における最終貫入量とリバウンド量が計測されている。そして、これらの計測値をいわゆる動力学公式（後出の式（13）参照）に代入することにより、杭基礎の支持力の推定が行われてきた。しかし、現在までのところ動力学公式に対する信頼性は必ずしも高くなく、補助的な役割を果しているにすぎないようにみうけられる。

実際、従来の動力学公式は剛体棒の衝突の理論を基に導かれた一種のエネルギー保存式であるが、式中に用いられるハンマー打撃効率の値として一般に 0.5 が用いられているものの、ハンマー打撃効率の実測

例は数少なく、問題の残るところである。

したがって杭打撃を一つの地盤探査法としてとらえるためには、杭体が弾性体であることを考慮して、杭体中の波動伝播を忠実に考慮した理論的枠組に基づいた、杭の貫入挙動の合理的解釈が望まれるところである。

近年、電子計測機器の急速な進歩に伴い、高速過渡現象の正確な計測が可能となり、応力波情報に基づく杭の動的支持力算定法が、注目を集めている¹⁾。その中で柳原²⁾とLundbergら³⁾によって、弾性棒の中間点2点におけるひずみ波形情報より、杭中を伝播する進行波と後退波を分離する方法(2点ゲージ法)が提案されているのが注目される。西田ら⁴⁾⁵⁾によって2点ゲージ法の模型杭の打撃貫入問題への適用が試みられているが、同法の実大杭への適用は、筆者らの知るかぎりでは、これまで未だ行われていない。

本報文では、2点ゲージ法の理論的基礎を要約した後、実際問題への適用例として、関西新空港連絡橋の基礎試験杭の打撃試験において計測された打撃ひずみ波形に対し、2点ゲージ法を用いて波動論的考察を加え、杭の動的貫入過程、ディーゼルハンマーの実際の打撃効率、および打撃時の地盤の動的抵抗と杭の実測された静的支持力との比較検討を行うものである。

2. 理論的基礎

2.1 一次元波動理論

杭体内の波動は、杭軸方向に一次元的に伝播すると仮定する。なお、以後の議論では杭頭を x 軸原点とし、先端に向かって正方向を考える。応力、ひずみについては、圧縮を正とする。

杭周面に抵抗が作用しない場合、杭体変位は一次元波動方程式(1)に従う。

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad c = \sqrt{\frac{gE}{\gamma}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、

u ; 変位 c ; 縦波の伝播速度
 E ; ヤング率 γ ; 単位体積重量
 g ; 重力加速度

である。

式(1)の一般解はD'Alembertにより次式のように与えられている。

$$u(x, t) = u_d(x - ct) + u_u(x + ct) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(2)の右辺の第一項は、 x 軸の正方向に伝播する進行波成分を表している。また右辺の第二項は、 x 軸の負方向に伝播する後退波成分を表わしている。すなわち式(2)は、杭体内の任意点 x の任意時刻 t における変位 u が、下降変位波と上昇変位波の重畳により得られることを示している。

また、式(1)は応力、変位速度についても成立する。すなわち、

$$\begin{aligned} \sigma(x, t) &= \sigma_d(x, t) + \sigma_u(x, t) \quad \dots\dots\dots (3) \\ v(x, t) &= v_d(x, t) + v_u(x, t) \end{aligned}$$

ここで杭打撃のごく初期段階のように、杭体中に下降波のみが存在する場合を考えると、変位速度と応力の間に次式の関係が成立つことがわかる。

$$v_d = \frac{\partial u_d}{\partial t} = -c \frac{\partial u_d}{\partial x} = c\varepsilon_d = \frac{c}{E} \sigma_d \quad \dots\dots\dots (4-a)$$

同様に、もし上昇波のみが存在する場合には、次式が成立つことを補足しておく。

$$v_u = -\frac{c}{E} \sigma_u \quad \dots\dots\dots (4-b)$$

式(3)と(4)を連立することにより、次式を得る。

$$v(x, t) = \frac{c}{E} \{ \sigma_d(x, t) - \sigma_u(x, t) \} \quad \text{..... (5)}$$

式(5)より、点 x における下降応力波成分と上昇応力波成分がわかれば、それらより同点での変位速度が計算されることがわかる。

さらに、変位速度を時間で積分することにより、変位の時刻歴が計算される。すなわち、

$$u(x, t) = \int_0^t v(x, t') dt' \quad \text{..... (6)}$$

2.2 2点ゲージ法による下降波と上昇波の分離

従来の杭打撃計測システムでは、Case Method⁶⁾に代表されるように、杭頭付近において応力と加速度の時刻歴を計測し、加速度波形を時間で積分して速度波形とした後、式(3)と式(5)の關係を用いて下降波と上昇波の分離が行われていた(Fig. 1 (a))。しかし、杭打撃などの衝撃現象に関しては、加速度計の許容入力加速度、測定周波数特性からの制限があり、得られるデータの解析処理も難しい。これに対し2点ゲージ法は、取扱いの容易なひずみゲージを、杭体中の周面抵抗が作用しない区間の異なる2点に配し(Fig. 1 (b))、応力波形を計測することによって下降波と上昇波の分離を行うもので、非常に有望な方法と考えられる。

ゲージ点1とゲージ点2における応力は、式(3)より次のように与えられる。

$$\begin{aligned} \sigma(L_{g1}, t) &= \sigma_d(L_{g1}, t) + \sigma_u(L_{g1}, t) \\ \sigma(L_{g2}, t) &= \sigma_d(L_{g2}, t) + \sigma_u(L_{g2}, t) \end{aligned} \quad \text{..... (7)}$$

両ゲージ点間には周面抵抗が作用していないので、この区間における同位相の下降波応力または上昇波応力の減衰はない。すなわち、

$$\begin{aligned} \sigma_d(L_{g2}, t) &= \sigma_d(L_{g1}, t - \Delta t) \\ \sigma_u(L_{g1}, t) &= \sigma_u(L_{g2}, t - \Delta t) \end{aligned} \quad \text{..... (8)}$$

ここに、

$$\Delta t = \frac{L_{g2} - L_{g1}}{c}$$

式(7)、式(8)より、次式の關係を得る。

$$\begin{aligned} \sigma_d(L_{g1}, t) &= \sigma(L_{g1}, t) - \sigma_u(L_{g1}, t) \\ &= \sigma(L_{g1}, t) - \sigma_u(L_{g2}, t - \Delta t) \\ &= \sigma(L_{g1}, t) - \{ \sigma(L_{g2}, t - \Delta t) - \sigma_d(L_{g2}, t - \Delta t) \} \\ &= \sigma(L_{g1}, t) - \sigma(L_{g2}, t - \Delta t) + \sigma_d(L_{g1}, t - 2\Delta t) \quad \text{..... (9-a)} \\ \sigma_u(L_{g1}, t) &= \sigma(L_{g1}, t) - \sigma_d(L_{g1}, t) \quad \text{..... (9-b)} \end{aligned}$$

式(9-a)において、右辺の第1項はゲージ点1の時刻 t における実測応力値を表している。右辺第2項は、ゲージ点2の時刻 $(t - \Delta t)$ における実測応力値を表す。また右辺第3項は、ゲージ点1の時刻 $(t - 2\Delta t)$ における下降応力波の振幅を表している。この値は、打撃初期においては下降波のみが存在する事実より、漸化的に既知である。これより式(9-a)の右辺はすべて既知量となり、ゲージ点1の

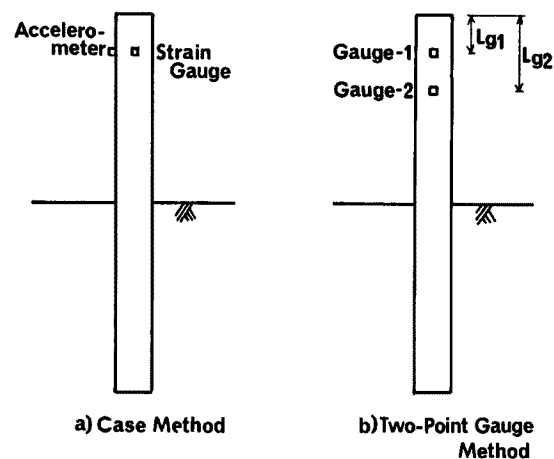


Fig. 1. Dynamic measuring systems at pile driving.

時刻 t における下降波応力が決定される。また、同式で得られた下降波応力を式 (9-b) に代入することにより、ゲージ点 1 の時刻 t における上昇波応力を算定することができる。

上述のような手順によって初期下降波と上昇波成分に分離しようと、任意点の応力、変位速度についても容易にその値を求めることができる。実際、杭頭 ($x=0$) においては、次式の表現を得る。

$$\begin{aligned}\sigma(0, t) &= \sigma_d\left(L_{g1}, t + \frac{L_{g1}}{c}\right) + \sigma_u\left(L_{g1}, t - \frac{L_{g1}}{c}\right) \dots\dots\dots (10) \\ v(0, t) &= \frac{c}{E} \left\{ \sigma_d\left(L_{g1}, t + \frac{L_{g1}}{c}\right) - \sigma_u\left(L_{g1}, t - \frac{L_{g1}}{c}\right) \right\}\end{aligned}$$

杭頭変位に関しては、次のように算定することができる。

$$u(0, t) = \int_0^t v(0, t) dt \dots\dots\dots (11)$$

また、杭頭においてハンマーから杭に伝達されるエネルギーは、式 (10) の関係を考慮すると、次式によって具体的に算定しうることを強調しておきたい。

$$w(t) = \int_0^t v(0, t') A \sigma(0, t') dt' \dots\dots\dots (12)$$

3. 長尺鋼管杭の打撃ひずみ波形とその解析

3.1 長尺鋼管杭に対する打撃試験の概要

関西新空港連絡橋基礎杭の支持力推定を目的として、静的載荷試験に供するための試験鋼管杭が打設された。この際、従来より行われてきた最終貫入量やリバウンド量の測定に加えて、杭打設時における打撃応力の測定が実施された。

試験地点は大阪湾東南部泉佐野沖 2600 m である。試験地点の案内図を Fig. 2 に示す。同図中 A 点は試験杭の位置を表し、B 点および C 点は杭体変位の測量点である。

橋軸方向の地層構成を Fig. 3 に示す。Fig. 3 より、海底の地層は陸より沖側に向かって 1/60 程度の勾配で、緩やかに傾斜していることがわかる。試験地点では、海面下 53 m 付近に支持層と考えられる砂層 (S4 層) が存在するが、その層厚は 3 m 弱であり、杭の設置時や載荷時の貫通の問題が懸念されている。実際、基礎杭に対しては摩擦杭としての機能が期待されている。

試験杭は 3 本 (T1, T2, T3 杭) であるが、ここでは T1 杭を対象とする。T1 杭の諸元を Table 1 に示す。T1 杭は、ラム重量 7.2 tf、平均落下高さ 240 cm のディーゼルハンマーにより打設され、杭体中の 12 点において打撃ひずみが測定された。杭先端が海面下 52.5 m (打ち止り) まで打設された状況を Fig. 4 に示す。同図中には、標準貫入試験より求められた、 N 値の深度分布も合せて示してある。

打撃試験⁷⁾は 1986 年 9 月 24 日、試験杭打設に伴い実施された。杭打設後放置期間 35 日を経て、静的載荷試験⁸⁾が行われた。静的鉛直載荷試験の結果得られた杭頭荷重～杭頭変位関係を Fig. 5 (a) に示す。同図 (a) より T1 杭の静的極限支持力は 1300 tf である。また、静的載荷試験において、杭頭荷重として 1300 tf が作用した場合における、杭の軸方向応力の深度分布を同図 (b) に示す。同図 (b) より、砂礫層 (Tg 層) 以深において軸方向応力の急激な減衰がみられ、静的載荷の場合にこの区間において大きな周面抵抗が作用していることがわかる。

前章で展開した 2 点ゲージ法を適用するにあたり、周面抵抗の作用していない区間での応力波形として、Fig. 4 中のゲージ No. 20 ($x=5.5$ m) とゲージ No. 17 ($x=21$ m) の点における応力波形を用いることとした。これは、2 点において計測される同位相の応力のデジタルデータ間隔が大きいほど、すなわち両点間の距離が大きいほど、2 ゲージ法より推定される変位など諸量の精度が向上するためである。この場

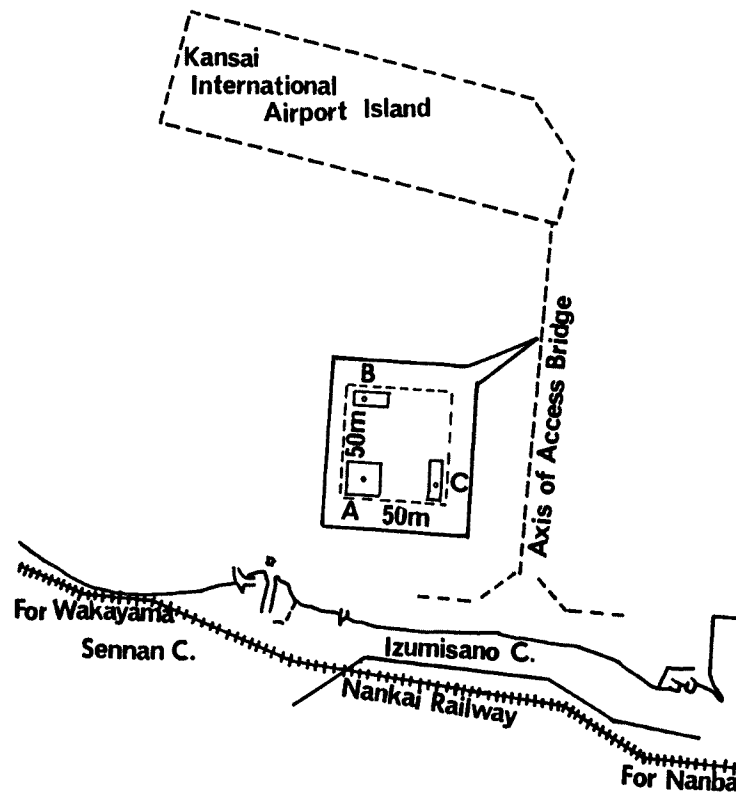


Fig. 2. Schematic location of test site.

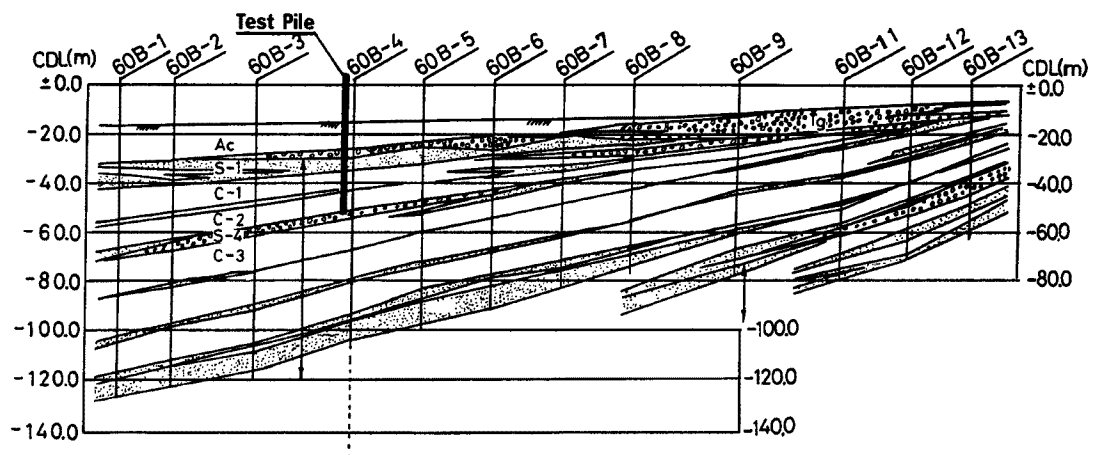


Fig. 3. Stratigraphy of Osaka-bay, near Izumisano.
(Along with the axis of access bridge)

Table 1. Specification of T1 pile

Length	58.0 m
Cross Sectional Area	1171.2 cm ²
Outer Diameter	150.0 cm
Wall Thickness	22 mm
Wave Velocity	5200 m/sec

合、後に述べるように波動伝播速度 c が 5200 m/sec であり、両点間の距離 Δx が 15.5 m、データサンプル間隔が 0.1 msec/word であるから、両点間でのデータのシフトは 30 個となる。

3.2 打ち止り時の測定応力波形

(1) 測定応力波形と応力波の伝播状況

ゲージ No. 20 およびゲージ No. 17 における測定応力波形を Fig. 6 に示す。まず同図 (a) のゲージ No. 20 での応力波形に着目すると、 $t=t_1$ 以前において応力の上昇が緩慢であり、その後に応力の急上昇が見られる。また時間軸上での位相のずれがあるものの、ゲージ No. 17 における応力波形でも同様に、打撃初期における応力の漸増とそれに続く応力の急上昇が見られる (Fig. 6 (b))。 $t=t_1$ 以前の応力の漸増はディーゼルハンマーのガス圧縮に起因するものであり、その後の応力の急上昇は爆発と衝撃作用によるものと考えられる。

次にゲージ No. 20, 10, 1 に対し、ピーク波の特性曲線

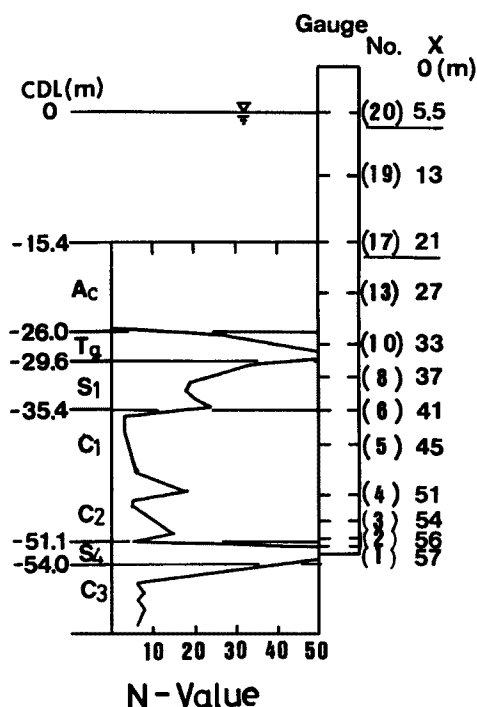
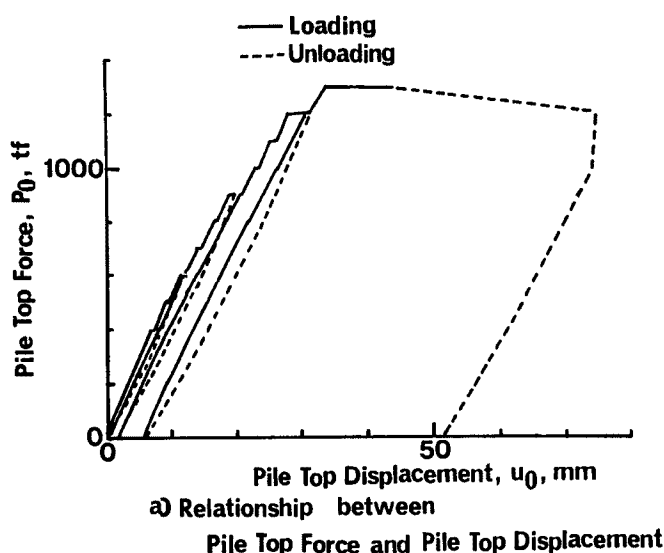


Fig. 4. Location of strain gauges and ground condition at pile site.

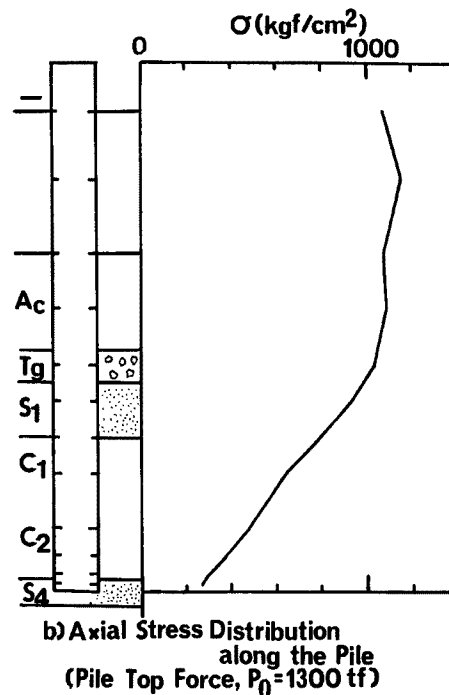


Fig. 5. Static loading test results.

に沿った波動の伝播状況を説明したのが Fig. 7 である。時間とともにピーク波が杭体中を降下し、先端で反射の後、引張波として杭頭に向かって上昇する様子がよくわかる。なお、ゲージ No. 20 を圧縮ピーク波が通過してから、杭先端で反射の後、引張ピーク波が同点に到着するまでに要する時間が 20.2 msec, その行程が 105 m であることから、同杭体中の波動伝播速度 $c = 5200$ m となる。

(2) ピーク波応力の減衰特性

No. 20 から No. 1 までの 12 ケ所のゲージ点における測定応力の圧縮最大値の深度分布を表したのが Fig. 8 である。同図には、杭先端が砂層 (S4 層) にある場合 (図中曲線 a) のピーク波応力の減衰状況に加えて、杭先端が洪積粘土層 (C2 層) にある場合 (図中曲線 b) のピーク波応力の減衰状況についても示している。

杭先端が砂層 (S4 層) に存在する場合のピーク波応力の減衰状況 (Fig. 8 曲線 a) に注目すると、深度が大きくなるとともに、ピーク波応力が減衰している。しかし、静的載荷試験において得られた軸方向応力の深度分布 (Fig. 5 (b)) と比較して、静的載荷の場合に軸方向応力が急激に減衰している砂礫層 (Tg 層) 以深でも、杭先端付近 (CDL-48 m 以深) を除いてピーク波応力の急激な減衰は見られない。Fig. 8 曲線 a は、ピーク波の伝播に伴う、特性曲線上の異なる時刻における圧縮応力の最大値を連結したものであり、静的載荷時における同一時刻での軸方向応力の深度分布とは、性質が異なることに注意が必要である。

Fig. 8 曲線 a において、ピーク波応力の減衰は、杭先端付近 (CDL-48 m 以深) において顕著である。また、杭先端が洪積粘土層 (C2 層) にある場合 (Fig. 8 曲線 b) においても、粘土層では砂層 (S4 層) に比べて作用する周面抵抗が小さいと考えられるにもかかわらず、同様に杭先端付近 (CDL-45 m 以深) において、ピーク波応力の著しい減衰がみられる。すなわち、杭先端付近における軸方向応力の急激な減衰は、周面抵抗の作用に起因するものではないと考えられる。

実際、Fig. 7 で示したように、杭先端付近では圧縮ピーク波の到着時刻と引張ピーク波の到着時刻が接近しており、ピーク波以前の打撃応力の立上がり時間 (ライズタイム) 中の波動が杭先端で反射し引張波となり、圧縮ピーク波に重畳し、ピーク波の振幅が低減される。杭先端に近くなるに伴い反射引張波の振幅が大きくなるので、振幅の低減は著しくなり、これにより杭先端付近においてピーク波応力が急激に減衰することとなる。

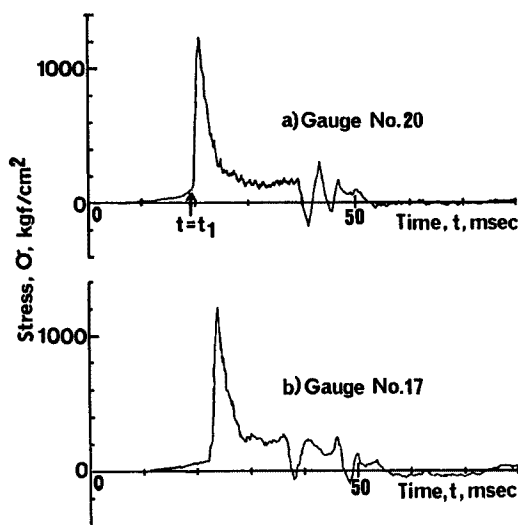


Fig. 6. Measured stress waves.

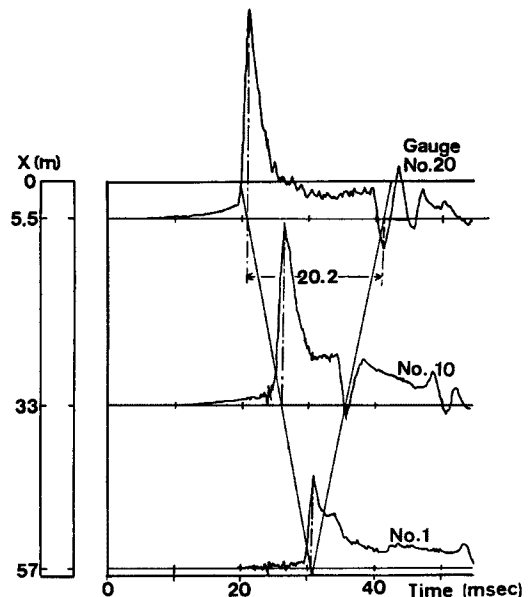


Fig. 7. Propagation of stress wave.

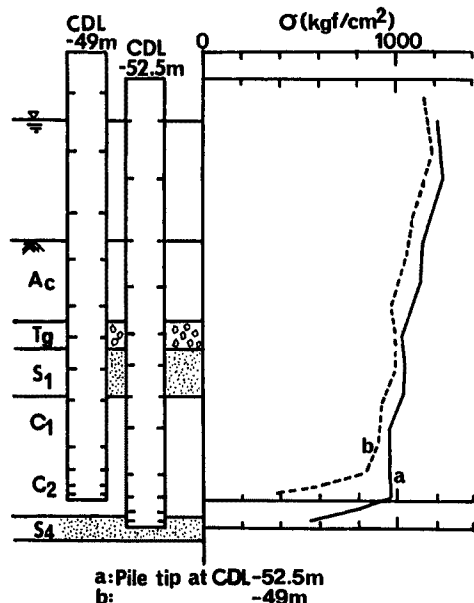


Fig. 8. Maximum compressive stress distribution.

本例の場合、ライズタイムは 1.5 msec、波動伝播速度が 5200 m/sec であるので、杭先端より 4 m 以内においては、いわゆる“静的解釈法”を適用した場合、周面摩擦の過大評価につながることに注意が必要である。

3.3 2点ゲージ法の適用

Fig. 6 に示したゲージ No. 20 および No. 17 における実測波形に対して、2点ゲージ法による動的貫入挙動の解析を行った。

(1) 動的貫入過程の評価

2点ゲージ法を用いて計算した、杭頭における変位の時刻歴を Fig. 9 に示す (式 (11) 参照)。2点ゲージ法による最終貫入量 S_f は 1.4 mm、リバウンド量 K は 10.6 mm である。一方、マニュアルによる実測貫入記録結果によると、最終貫入量 $S_f = 2$ mm、リバウンド量 $K = 7$ mm である。

マニュアル法では、鉛筆の測定者に対する上下動、測定者の足場の揺動より、動的変位への追従性が問題となり、測定精度は期待できない。これを考慮すると、マ

ニュアル法による実測変位と 2点ゲージ法による計算変位はよく適合していると考えてよい。

なお、2点ゲージ法によると、Fig. 9 に示すように、最終貫入量やリバウンド量のみならず、杭の動的変位の全過程を追跡し得ることに、改めて留意しておきたい。

(2) ハンマーの打撃効率の評価

式 (12) に基づいて算定した、ハンマーより杭に伝達されたエネルギー W の経時変化を Fig. 10 に示す。同図では、ハンマーから杭に伝達されるエネルギー W を、ハンマーの位置エネルギー Mgh で除して無次元化し、打撃効率としている。Fig. 10 より、ハンマーから杭に実際に伝達されたエネルギーは、ハンマーの位置エネルギーの 45% であることがわかる。

従来の動力学公式によると、ディーゼルハンマーの有する公称エネルギーとして、ハンマーの位置エネルギーの 2 倍をとることが多い。この場合には、本例の実際の打撃効率 $e_f = W / (2Mgh) = 0.22$ となり、通常仮定されている値 0.5 と比較して、かなり小さな値にとどまることに注意が必要である。

(3) 動力学公式の適用に関する考察

文献 7) によると、式 (13) の動力学公式によって T1 杭の支持力値として、 $R_d = 3128$ tf という値を得ている。ただし、式 (13) 中に代入する値として、打ち止り時の貫入記録より、最終貫入量 $S_f = 2$ mm、リバウンド量 $K = 7$ mm を用いている。また、打撃効率として $e_f = 0.5$ を用いている。

$$R_d = \frac{e_f \cdot 2Mgh}{S_f + \frac{K}{2}} \quad \dots\dots\dots (13)$$

ここに、 Mg はハンマー重量、 h はハンマー落下高さである。

しかるに静的載荷試験より、実測の R_d 値は 1300 tf であり、両者の間には大きな隔たりがある。

ところで、前項において 2点ゲージ法を用いて求めた打撃効率 $e_f = 0.22$ を式 (13) に代入すると、動的支持力は 1376 tf となり、静的載荷試験結果と概ね対応し、興味深い結果となる。

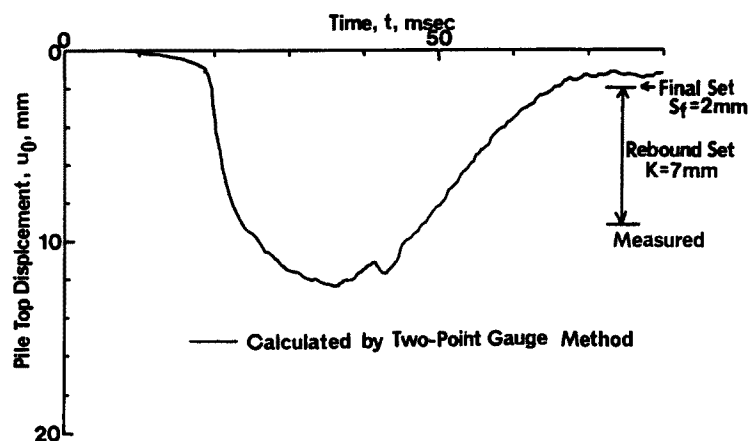


Fig. 9. Time variation of pile top displacement by Two-Point gauge Method.

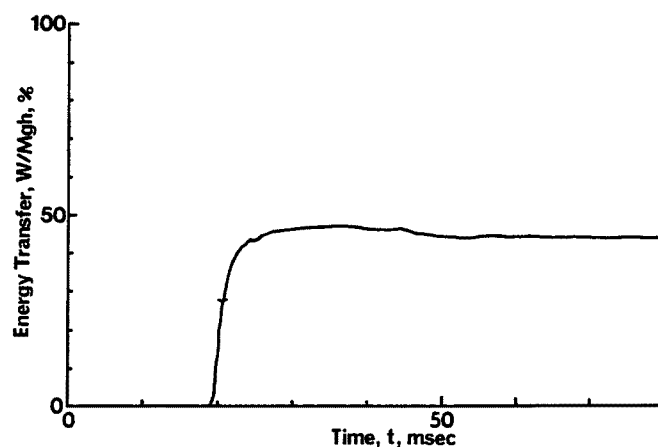


Fig. 10. Time variation of transferred energy by Two-Point Gauge Method.

4. 結 論

関西新空港連絡橋の基礎試験杭打撃試験の結果計測されたひずみ波形に対し、波動論に基づいた考察を行った。その結果得られた知見は次のようである。

1) 打撃時のひずみ波形に対して、ピーク波の減衰状況を基に、静的載荷試験と同様の周面摩擦抵抗解釈法を適用することは、杭先端付近において周面摩擦の過大評価につながる。(Fig. 8 参照)

2) 2点ゲージ法により、杭の打撃貫入性の評価を行った。その結果、最終貫入量、リバウンド量に関して、マニュアルによる実測値との良い一致が得られた。また、2点ゲージ法により、杭の動的貫入の過程を追跡することが可能となった。

3) 2点ゲージ法により、従来測定が困難であったディーゼルハンマーの打撃効率の評価が可能となった。今回、2点ゲージ法を用いて打撃効率の算定を行ったところ、算定打撃効率は0.22であり、従来より動力学公式において用いられてきた0.5と比較して、かなり小さな値を得た。さらに、動力学公式において打撃効率として0.22を用いて支持力を計算した場合に、静的載荷試験より得られた支持力値とよい一致を得た。

以上より、2点ゲージ法は、杭の動的貫入挙動を解析する手法として、極めて有効であると考えられる。

謝 辞

本報文をまとめるにあたり、貴重な載荷試験および打撃試験データを提供していただきました本山 蒔氏（関西国際空港㈱）、ならびに打撃ひずみ波形のA/D変換処理に際して便宜をはかっていただきました佐々木孝雄氏（新日本製鉄㈱）に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Proceeding of 2nd International Conference on Application of Stress-Wave Theory on Pile, A. A. BALKEMA, 452 PP., 1984.
- 2) 柳原直人：“一次元弾性応力波理論による衝撃力測定法”，日本機械学会論文集，第43巻，pp. 374-376，1977.
- 3) Lundberg, B. and Henchoz, A.: “Analysis of Elastic Waves from Two-point Strain Measurement”, J. Experimental Mechanics, Vol. 17, pp. 213-218, 1977.
- 4) 西田義親，松本樹典，河上清和，石本一鶴：“2点ゲージ法による杭打ち時の応力波解析”，第22回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 1219-1222，1987.
- 5) 西田義親，松本樹典，河上清和，鈴見裕司：“2点ゲージ応力波解析法の周面摩擦杭への適用”，第22回土質工学研究発表会講演概要集，pp. 1223-1226，1987.
- 6) Rausche, F., Goble, G. G. and Likins, G. E.: “Dynamic Determination of Pile Capacity”, Proc. ASCE, Vol. 111, GT 3, 1985.
- 7) 関西国際空港株式会社，鋼管杭協会：空港連絡橋鋼管杭載荷試験報告書，2 施工試験編，1987年2月.
- 8) 関西国際空港株式会社，鋼管杭協会：空港連絡橋鋼管杭載荷試験報告書，3 載荷試験編，1987年2月.