

衝撃弾性波法を適用したコンクリート基礎杭 の形状推定に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON NON-DESTRUCTIVE ESTIMATION OF SHAPE
OF CONCRETE PILE BY IMPACT WAVE METHOD

山田 和夫
Kazuo YAMADA

ABSTRACT In this study, the applicability of impact echo method to evaluate the sectional shape of concrete pile was examined experimentally. Following results were obtained in this study:

- 1) In the case that the angle between input point and setting point of accelerometer is 90 degrees, the reflect wave is hardly affected by the flexural vibration of concrete pile, and the measured waveform becomes most simple one.
- 2) When the time more than 24 and 3 hours passes after filling and driving the concrete pile, it is difficult to detect the wave reflected from the pile tip, because the effect of soil and cement milk around the concrete pile becomes remarkable, respectively.
- 3) In the concrete pile that the ratio of length to diameter is relatively small, the accuracy of estimation on the sectional shape of concrete pile is not satisfactory as compared with the slender concrete pile.

1. はじめに

近年、コンクリート基礎杭の支持力を大きくさせることを目的として、拡底コンクリート基礎杭や先端根固め鋼管基礎杭などといった杭の断面を変化させた基礎杭が多く使用されるようになってきた。これらの基礎杭の性能を評価する方法としては、通常載荷実験によって杭の静的支持力を測定する方法¹⁾・²⁾やCASE法のような動的支持力を測定する方法³⁾・⁴⁾などが用いられている。しかし、これらの評価方法は、いずれも大がかりな載荷試験を行わなければならぬという欠点があるため、施工後のコンクリート基礎杭の性能を比較的簡便に評価できる方法の開

発が強く要望されている。

筆者は、これまでコンクリートの内部探査を対象とした弾性波法による非破壊試験方法の確立を目的として、一連の基礎的検討を行ってきた⁵⁾・⁶⁾。本研究では、弾性波法を適用した比較的簡便なコンクリート基礎杭の形状推定方法の開発を目的として、まず弾性波法の中でも特に機械的方法によって発生させた衝撃弾性波の伝播特性を利用したコンクリート基礎杭の形状推定方法の適用性・可能性について一連の検討を行った。

2. コンクリート基礎杭の断面形状推定方法

本研究では、杭の形状推定方法として筆者らが鉄筋の腐食推定のために提案した方法⁵⁾を用いた。

2.1 波動速度の反射・透過

コンクリート基礎杭の断面積が $i - 1$ から i へと変化する境界面 i に弾性波が到達すると、一部は境界面を透過するが、一部は反射する。この時、透過率 (T_i) および反射率 (R_i) を波動速度で評価すると、 T_i および R_i は、それぞれ

$$T_i = \frac{2 \eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}}, \quad R_i = \frac{1 - \eta_{i-1}}{1 + \eta_{i-1}} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

ここに、 η_{i-1} ：インピーダンス比 ($= Z_i / Z_{i-1}$)、
 Z_{i-1} ：入力側の機械インピーダンス、
 Z_i ：透過側の機械インピーダンス。
 で表されることが知られている。なお、コンクリート基礎杭のような棒材の機械インピーダンス (Z) は、次式で与えられる。

$$Z_i = A_i \cdot E_i / v_i \quad \dots \dots \dots \quad (2)$$

ここに、 A_i ：杭の断面積、

E_i ：ヤング係数、

v_i ：波動の伝播速度。

したがって、ヤング係数 (E) および波動の伝播速度 (v) が杭内部で一定と仮定できる場合には、インピーダンス比 η は杭の断面積比となる。

2.2 弹性波入力点で検出される反射波の速度比

(1) 杭内部の境界面で反射した波動

波動の距離減衰を考慮し、かつ多重反射の影響を無視すると、 i 番目の境界から反射した波動が入力点に到達したときの波動速度の入力速度に対する比率 (V_i) は、以下のようにになる。

$$\begin{aligned} & \text{—— } i \text{ 境界面からの反射} \\ V_i &= 2 \{ T_1 \cdot T_2 \cdots T_{i-1} \} \cdot R_i \cdot \{ T_{i-1}' \cdots T_1' \} \lambda^{L_i} \\ & \text{入力方向の透過} \quad \text{反射方向の透過} \\ &= 2 \prod_{j=1}^{i-1} \left\{ \frac{4 \eta_j}{(1 + \eta_j)^2} \right\} \frac{1 - \eta_i}{1 + \eta_i} \lambda^{L_i} \quad \dots \dots \dots \quad (3) \end{aligned}$$

ここに、 λ ：波動速度の単位長さ当たりの減衰率、
 L_i ：入力点から i 番目の境界までの距離。

(2) 終点の境界で反射した波動

終点の境界 n が自由端の場合には、自由端からの

反射率 R_n が 1 となるため、入力点に到達した波動速度の入力値に対する比率 (V_n) は、次のようになる。

$$V_n = 2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \quad \dots \dots \quad (4)$$

また、終点の境界 n が固定端の場合には、固定端からの反射率 R_n が -1 となるため、この場合の V_n は、次式で与えられる。

$$V_n = -2 \prod_{i=1}^{n-1} \left\{ \frac{4 \eta_i}{(1 + \eta_i)^2} \right\} \lambda^{L_n} \quad \dots \dots \quad (4)'$$

2.3 パラメータの算定方法

杭が n 個の節点 (始点が 1、終点が n) で分割されている場合を考える。いま、終点 (境界 n) が自由端で、その境界からの反射波の到達速度 (式(4)) と境界 $n - 1$ からの反射波の到達速度 (式(3)) との比 I_{n-1} を求めると、以下のようにになる。

$$I_{n-1} = \frac{V_n}{V_{n-1}} = \frac{4 \eta_{n-1}}{1 - \eta_{n-1}^2} \lambda^{L_n - (L_{n-1})} \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

ただし、終点が固定端の場合には、式(4)の代わりに式(4)' を用いなければならない。また、境界 $n - 1$ からの反射波の到達速度と境界 $n - 2$ からの反射波の到達速度との比 (I_{n-2}) は、

$$\begin{aligned} I_{n-2} &= \frac{V_{n-1}}{V_{n-2}} \\ &= \frac{4 \eta_{n-2}}{1 - \eta_{n-2}^2} \frac{1 - \eta_{n-1}}{1 + \eta_{n-1}} \\ &\times \lambda^{(L_{n-1}) - (L_{n-2})} \quad \dots \dots \dots \quad (5)' \end{aligned}$$

となり、同様の手順で順次 I_{n-3} 、 \dots 、 I_2 、 I_1 を求めることができる。

杭断面の形状変化に関連するインピーダンス比 η_{n-1} は、減衰率 λ が仮定されれば、式(5)より次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \eta_{n-1} &= [-2 \lambda^{L_n - (L_{n-1})} + \{ 4 \lambda^{2(L_n - (L_{n-1}))} \\ &+ (V_n / V_{n-1})^2 \}^{1/2}] \\ &/ (V_n / V_{n-1}) \quad \dots \dots \dots \quad (6) \end{aligned}$$

同様の手順で、 η_{n-2} 、 \dots 、 η_1 を順次求めることができる。本研究では、準ニュートン法による非線

Table.1 Outline of experiment.

Experimental variables on pile						Measuring time (hr.)	Setting angle (degree)
Propotion	Setting	Length (m)	Diameter (cm)	RSL (%)	LSL (cm)		
ST-type	Driving	5	30, 50, 60,	0, 25,	0	± 0, 1, 3	90
SL-type	Filling	7	30(+5),	50,	5	5, 8, 24	
BE-type	Suspending	9	50(+10)	100			180

[Notes] ST-type: Straight pile, SL-type: Section loss pile, BE-type: Bottom expansion pile, RSL: Ratio of section loss, LSL: Length of section loss, Value in (): Increase in diameter of bottom expansion pile.

形最小二乗法を用いて λ の値を決定した。

杭の断面寸法(D)の変化は、波動の伝播速度(v)と杭のヤング係数(E)を一定と仮定すると、次式を用いて算定できる。

$$\begin{aligned} RD_{i-1} &= D_i / D_{i-1} = \sqrt{(A_i / A_{i-1})} \\ &= \sqrt{(Z_i / Z_{i-1})} = \sqrt{\eta_{i-1}} \\ &\dots \dots \dots \quad (7) \end{aligned}$$

なお、杭の断面寸法の変化位置(x_i)は、反射波の到達時間(t_i)と波動の伝播速度(v)とを用いて次式より計算できる。

$$x_i = 0.5 \cdot t_i / v \quad \dots \dots \dots \quad (8)$$

3. 実験方法

3.1 実験の概要

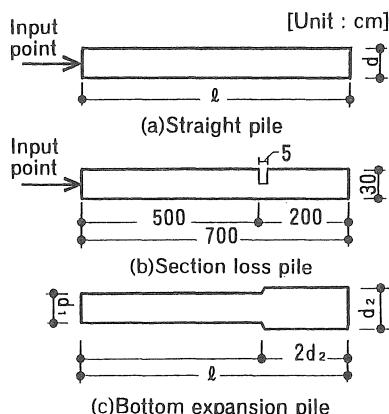


Fig.1 Example of specimen.

Hammer for generating impact wave

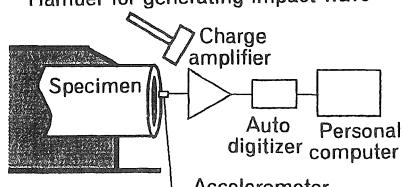


Fig.2 Block diagram of measuring system.

実験の概要をTable. 1に示す。本研究では、実験要因として杭の設置状況(空中横置き杭、盛土杭および打設杭の3種類)、杭の種類(定径杭、欠損杭および拡底杭の3種類)、杭長($l=5, 7$ および 9m の3種類)、杭径($d=30, 50$ および 60cm の3種類)、欠損率(0, 25, 50および100%の4種類)、欠損幅(0および5 cmの2種類)、変換子の設置位置と打撃位置との角度(90および180°の2種類)、並びに計測時刻(杭の盛土または打設の直前、直後、1, 3, 5, 8および24時間経過後の7種類)を取り上げた。試験体の一例をFig. 1に示す。

3.2 計測・処理方法

本実験で用いた計測システムのブロックダイアグラムをFig. 2に示す。計測に際しては、まず鋼製ハンマーで杭頭を軽打することによって発生させた衝撃弾性波を杭に入力し、伝播弾性波を超小型圧電型加速度ピックアップ(PV-90B型)で検出した。検出された弾性波は、計算機に転送して各種の波形処理を行った。計測は、原則として同一試験体に対して繰返し5回行い、計測波形の集合平均化処理を施して雑音の影響を極力低減させるよう工夫した。

4. 実験結果とその考察

4.1 測定結果に及ぼす打撃点と変換子の設置位置の影響

Fig. 3は、測定された生の加速度波形データに及ぼす変換子の設置位置の影響を示したもので、図(a)が打撃点と変換子位置との角度が90°、図(b)が180°とした場合の結果である。これらの図によれば、どちらの場合も打撃波と杭先端からの反射波が明瞭に検出されているが、図(b)においては、打撃波と杭先端からの反射波以外に別の成分を持つ波形も検出されている。これは、杭の曲げ振動による成分であるものと考えられ、この場合には平面波による縦

波と曲げ振動による波とが混在するため、後の波形処理が複雑になることが予想される。したがって、設置角度を 90° とした場合が曲げ振動の影響を受け難く、最も単純な波形が得られるため、解析に適しているといえる。

4.2 反射波の検出性能および検出波形の経時変化

(1) 空中横置き杭

Fig. 4 および Fig. 5 は、それぞれ杭長が 9m で杭径(d)に対する杭長(ℓ)の割合を 30 とした場合および $\ell/d = 15$ とした場合の定径杭によって得られた結果を示したもので、図(a)が検出加速度波形データの一例、図(b)がその自己相関関数を示したものである。これらの図によれば、 $\ell/d = 30$ の場合には、打撃波および杭先端からの反射波がともに検出可能であり、約 $4217 \mu s$ の時間差(Δt)でかなり有意な正の相関が認められる。この時間差 $4217 \mu s$ は、コンクリート中を伝播する弾性波の伝播速度(4246m/s)を用いて距離に換算すると 9m となり、杭長と合致する。一方、 $\ell/d = 15$ の場合には、反射波よりも杭頭表面を伝播する表面波の影響の方が卓越するためか、打撃波は確認できるものの杭先端からの反射波は確認するのが困難である。以上のことから、杭長に対して杭径が大きい太短い杭よりも細長い杭の方が杭先端からの反射波の検出が容易といえる。Fig. 6 は、杭径が 30cm で杭長が 7m、欠損率が 50% の欠損杭によって得られた結果を示したものである。図によれば、杭先端位置に相当する時間差($3235 \mu s$)で有意な正の相関は認められるが、欠損位置に相当する時間差(欠損の始点: $2303 \mu s$ 、欠損の終点: $2326 \mu s$)では有意な相関は認められず、若干ずれた時間差($2254 \mu s$ および $2340 \mu s$)の所で有意な正と負の相関を示す箇所のあることがわかる。なお、この正と負の有意な相関を示す時間差の区間に欠損部分の始点位置と終点位置が存在している。Fig. 7 は、杭長が 9m

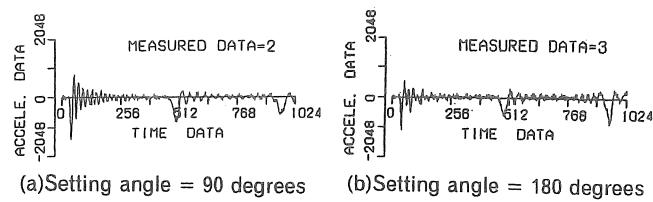


Fig.3 Example of acceleration waveform data
(Straight pile, $\ell = 7m$, $d = 30cm$).

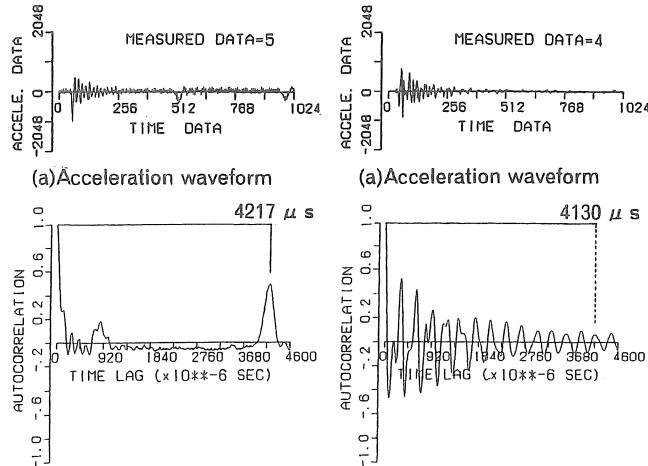


Fig.4 Experimental results
(Straight pile, $\ell/d = 30$,
 $\ell = 9m$, $d = 30cm$).

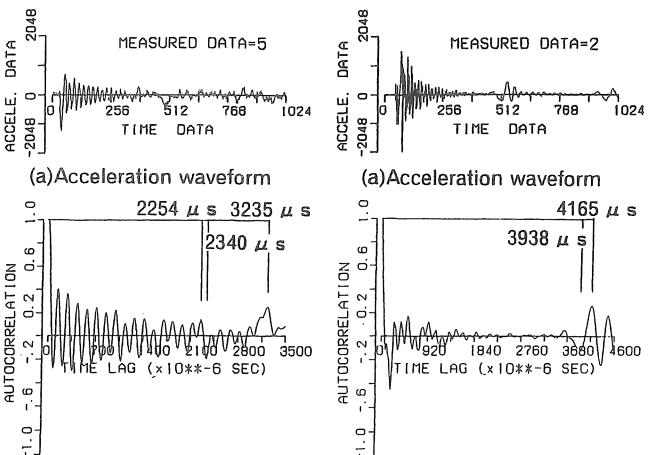


Fig.5 Experimental results
(Straight pile, $\ell/d = 15$,
 $\ell = 9m$, $d = 60cm$).

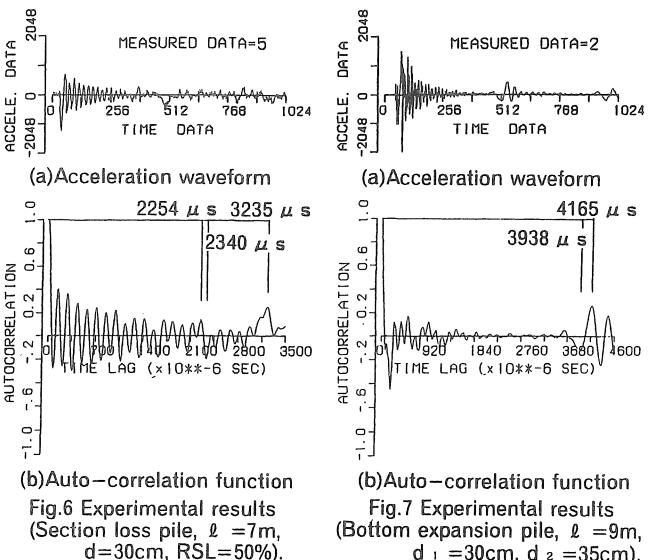
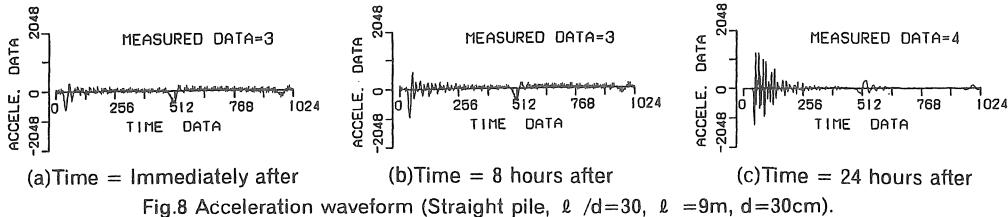
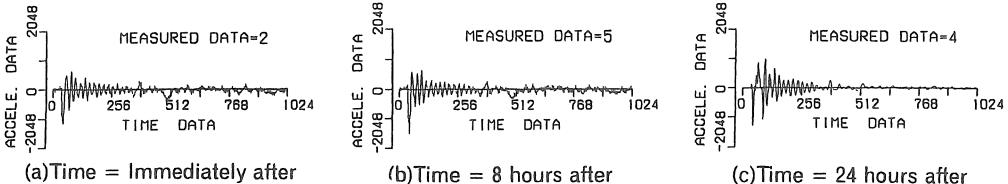
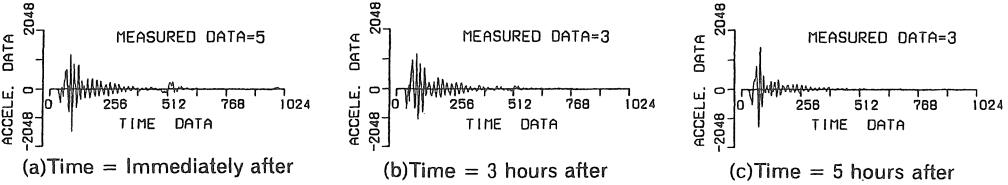
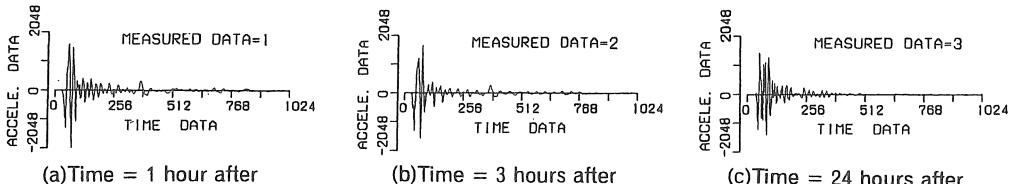


Fig.6 Experimental results
(Section loss pile, $\ell = 7m$,
 $d = 30cm$, RSL = 50%).

の拡底杭によって得られた結果である。図によれば、約 $4165 \mu s$ の時間差で有意な正の相関が認められるが、この時間差を距離に換算すると 9.1m となり、杭長とほぼ合致する。また、約 $3938 \mu s$ の時間差で有

Fig.8 Acceleration waveform (Straight pile, $l/d=30$, $l=9\text{m}$, $d=30\text{cm}$).Fig.9 Acceleration waveform (Section loss pile, $l=7\text{m}$, $d=30\text{cm}$, $RSL=50\%$).Fig.10 Acceleration waveform (Straight pile, $l/d=23$, $l=7\text{m}$, $d=30\text{cm}$).Fig.11 Acceleration waveform (Section loss pile, $l=7\text{m}$, $d=30\text{cm}$, $RSL=50\%$).

意な負の相関が認められるが、この時間差は杭断面が増大している箇所から反射してきた波の到達時間($3850\mu\text{s}$)とほぼ一致している。

(2) 盛土杭

Fig. 8 は、杭径(d)が 30cm で杭長(l)が 9m の定径杭($l/d = 30$)によって得られた検出波形の経時変化を示したものである。この図によれば、盛土後8時間までは打撃波および杭先端からの反射波がともに検出可能であることがわかる。なお、図には示していないが、 $l/d = 15$ の場合には杭先端からの反射波を確認するのが困難であることがわかった。Fig. 9 は、杭径が 30cm で杭長が 7m 、欠損率が 50% の欠損杭によって得られた検出波形を示したものである。図によれば、盛土後8時間までの範囲では欠損位置および杭先端からの反射波がかなり明確に検出できることがわかる。なお、盛土後24時間経過すると、杭先端からの反射波の出現方向が逆転しているが、

これは杭先端の境界条件が自由端とは認められなくなったためと思われる。

(3) 打設杭

Fig. 10は、杭径が 30cm で杭長が 7m の定径杭によって得られた検出波形の経時変化を示したものである。図によれば、打設後3時間までの範囲では杭先端からの反射波がかなり明確に検出できているが、それ以上時間が経過すると、杭先端からの反射波の検出は難しくなっている。Fig. 11は、杭径が 30cm で杭長が 7m 、欠損率が 50% の欠損杭によって得られた結果を示したものである。図から明らかなように、打設後1時間までの範囲では、欠損位置および杭先端からの反射波がある程度検出できているが、打設後3~5時間の範囲では、欠損位置からの反射波のみが検出可能であり、さらにそれ以上の時間が経過すると、欠損位置および杭先端からの反射波とも検出が困難となっている。

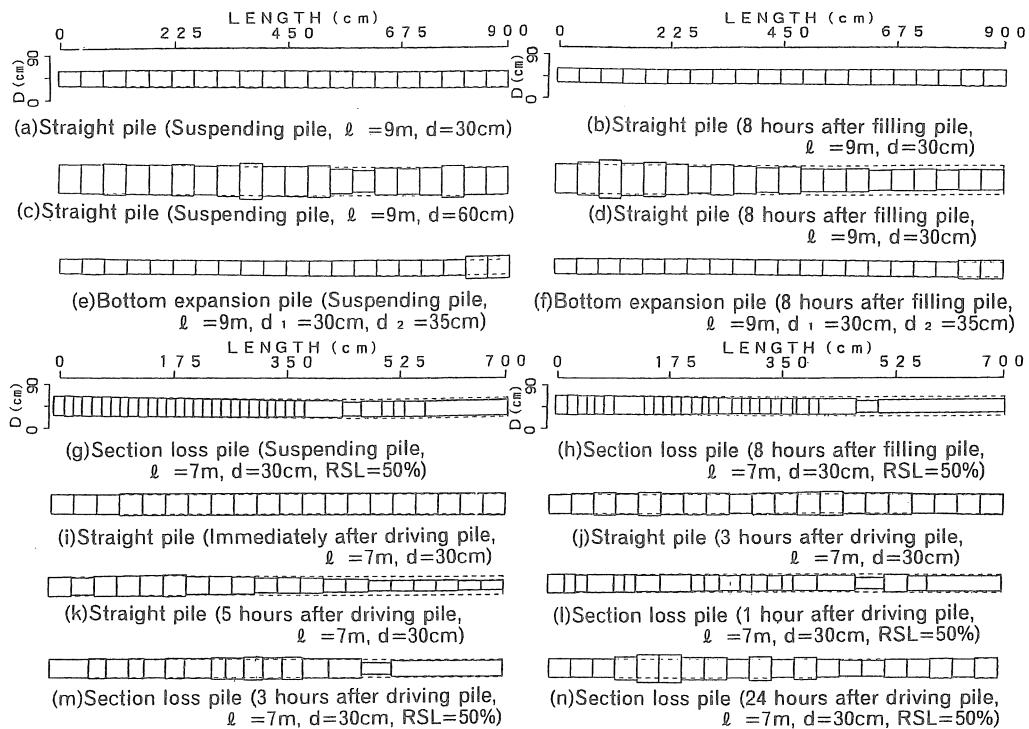


Fig.12 Results of estimation on cross section of concrete pile.

4.3 コンクリート基礎杭の形状・寸法の推定結果

Fig.12(a)～(n)は、第2章で示した手法を用いて行った杭の形状推定の結果の例を示したものである。これらの図によれば、杭長に比べて杭径が小さい細長い杭および盛土・打設後それほど時間が経過していない場合には、多重反射波による影響は認められるものの、杭断面の変化性状をかなりの精度で推定できているが、杭長に比べて杭径が大きい太短い杭および盛土・打設後ある程度以上時間が経過した場合には、杭断面の推定精度が悪くなっているのがわかる。これは、弾性波の伝播特性に及ぼす杭周囲の土の影響が著しくなるためであり、今後弾性波の入力方法や検出波形の処理方法を含めて詳細に検討していく必要がある。

5. 結論

本研究では、衝撃弾性波法によるコンクリート基礎杭の形状推定の適用性について一連の検討を行った。本研究で得られた結果は、およそ次のようにまとめられる。

- 1) 打撃点と変換子位置の成す角度が90°の場合が曲げ振動の影響を受け難く、解析に適した最も単純な波形が得られる。
- 2) 盛土杭では、盛土後24時間経過すると土の影響が著しくなり、杭先端からの反射波がとらえ難くなる。また、打設杭では、打設後約3時間以上経過すると根固め用セメント・ミルクの影響が現れ出し、杭先端からの反射波がとらえ難くなる。
- 3) 杭長に比べて杭径が大きい太短い杭では、杭頭表面を伝播する波の影響が著しいため、杭の形状推定精度は、細長い杭の場合と比較して若干悪くなる。

【謝 辞】

実験およびデータ整理に際して御助力を得た、愛知工業大学大学院生の桃木佳子嬢、愛知工業大学学部学生の池田弘治君、稻富孝之君および立川みどり嬢に対して謝辞を表します。また、本研究費の一部は、ヨーコン(株)および(株)東京ソイルリサーチの奨学寄附金によったことを付記し、謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 土質工学会：杭基礎の調査・設計から施工まで、現場技術者のための土と基礎シリーズ1
- 2) K. Fujita, et al. : On the Evaluation of Static Bearing Capacity, Application of Stress-Wave Theory on Piles, Third International Conference, Ottawa, Canada, pp.525-534 (1988)
- 3) G.G. Goble, et al. : The Analysis of Pile Driving -A State of the Art, Proc. of the International Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, pp. 131-161 (1980)
- 4) F.L. Beringen, et al. : Dynamic Pile Testing - An Aid in Analyzing Driving Behavior, Proc. of the Int. Seminar on the Application of Stress-Wave Theory on Piles, Stockholm, pp.77-97 (1980)
- 5) 桃木佳子・山田和夫・林隆浩・阿部秋男：衝撃弾性波法を適用した鉄筋の腐食推定に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第1号、pp. 607-612 (1993)
- 6) 林隆浩・山田和夫・阿部秋男・桃木佳子：腐食した鉄筋内部の弾性波動伝播特性に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第1号、pp. 649-654 (1993)

(受理 平成6年3月20日)