

## 打込み杭の動的変位計測システムについて

服部 秀人\*・小林 清\*\*・峯村 賢次\*\*\*  
宮下 秀樹\*\*\*\*

### “A System for Measuring Displacements of Driven Piles.”

Hidetō HATTORI, Kiyoshi KOBAYASHI, Kenji MINEMURA  
and Hideki MIYASHITA

In execution management of foundation piles, the bearing capacity of a driven pile is usually estimated by the pile driving formula, assuming that the values of settlement and rebound of the pile are measured precisely. To obtain those values, various measuring methods are used. One is to use the recording paper stuck on the surface of the pile and mark it, and the other is to use instruments such as an electro-optical displacement meter or a high-speed camera.

However, the methods mentioned above involve several problems in terms of safety, reliability, workability or operationability. So, the authors devised a system that displays pile displacement in the form of waves simultaneously with the progress of the work by integrating acceleration through analogue circuits.

In this report, an outline of this measuring system and an example measurements at the job site are described.

### 1. は じ め に

基礎杭の施工において、杭の打止め管理を行う場合、我が国では、杭の貫入量とリバウンド量を計測して支持力を推定する方法が一般に用いられている。支持力推定式の妥当性は種々検討されており<sup>(1)~(5)</sup>、計算式自体の信頼性は高いと言える<sup>(6)</sup>。しかし、それには大きな前提がある。すなわち、杭の貫入量とリバウンド量が正しく得られているということである。これら諸量の計測には、従来、杭に貼付した記録紙に人間が直接印を付ける方法、光学式計測法および高速度カメラによる方法等が用いられているが、後述のごとく、種々問題があつて、貫入量およびリバウンド量の計測技術の実用性と信頼性の向上が重要な課題となっているのである。

---

\* 土木工学科 助教授

\*\* 土木工学科 技官

\*\*\* 電気工学科 技官

\*\*\*\* (株)守谷商会 技術研究所主任

原稿受付 昭和62年9月30日

筆者らは、杭頭に取り付けた加速度計より得られる加速度波形を、アナログ積分回路を用いて積分し、リアルタイムに杭頭変位を計測するシステムを考案した。そして、本システムの実用上の問題点を調べるために現場計測を実施したので、ここにその結果を報告する。

## 2. 杭の打止め管理の概要

### 2-1 杭の動的支持力算定について<sup>(6)</sup>

杭の貫入量、リバウンド量などを用いて動的支持力を算定する方法は、施工現場で広く採用されている。この算定には、ハンマーによる打撃エネルギーと打込仕事とのつり合い条件に基づく、Hiley 系のものと、杭体中を伝播する応力波に関する波動方程式を解析するものがある。後者の波動理論に基づく方法が現象をより良く説明できると言われている。

現在実用に供されている波動理論に基づく解析法には次のようなものがある。

- ① Smith の数値解析法
- ② Goble の数値解析法 (CAPWAP Method, Case Method)
- ③ 道路橋示方書式

Smith は、ハンマーと杭をバネと質点に置換して杭の動的な挙動を求める解析法を提案した。しかし、この数値解析法は、杭体の応力を検討するには適当であるが、杭の支持力を知るためには不便であると言われている。杭頭の力と速度を境界値とした Goble らの Case Method は、キャップ、クッション等の動的性質など杭頭における境界条件を明確にすることが困難であることから、算出される支持力は信頼性の低いものになる恐れがある。

道路橋示方書式は、杭頭の変化（リバウンド測定量）を境界値とした実用式である。杭頭で実測した応力波形と高速カメラによる変位波形をもとに波動方程式を解いて、式(1)が誘導される。

$$R_d = \frac{AE(S+K_s+2K_o)}{2e_o l} + \frac{\bar{N}U}{e_f} \quad (1)$$

右辺第1項は先端支持力に関するもので、第2項は打込み時に低減される杭周面の摩擦力である。ここに、 $A$ 、 $l$ 、 $U$ 、 $E$ はそれぞれ杭の断面積、長さ、周長、ヤング率、 $\bar{N}$ は杭周面の平均 $N$ 値であり、 $S$ 、 $K_o$ 、 $K_s$ はそれぞれ貫入量、杭体の弾性によるリバウンド量、杭先端地盤のリバウンド量、 $e_o$ 、 $e_f$ は補正係数である。式(1)は信頼性が高いと言われているが貫入量 $S$ とリバウンド量 $K_s$ 、 $K_o$ が精度良く求められていることが重要である。

### 2-2 変位計測の信頼性向上の必要性

式(1)のような支持力公式により杭の打止め管理を行う場合、貫入量やリバウンド量を知るための変位計測が必要である。従来、変位計測は、杭体に貼付した記録紙に、人間が鉛筆で印を付け、貫入量とリバウンド量を読み取る方法が広く用いられてきた。鉛筆を持つ人間の手を不動点と見なして計測している訳で、劣悪な杭打環境の中ではその不動点確保が著しく困難であり、個人差も少なくなく、信頼性、作業の安全性の面で問題が多い。杭体の弾性によるリバウンドと杭先端地盤のリバウンドには位相差があるので、この記録紙による方法では、それらリバウンド量を分離して計測するのが非常に難しい。

また、杭の打止め管理のための変位計測は、現場で必ず行われる実物大の動的貫入試験と

考えることができ、データを精度良く採取することが、打込み杭の支持機構の解明のみならず基礎地盤に関する有益な情報を得ることに也大いに役立つであろう。動的支持力算定法の信頼性向上と計測技術の向上は表裏一体であり、現場の厳しい使用条件に耐え、簡便で信頼性の高い計測管理システムの開発は重要な課題となっている。

### 3. リバウンド計測システム

#### 3-1 支持力算定のための計測手法

杭の動的支持力を算定するためのデータ計測には、①ひずみと加速度を計測する方法と、②変位を直接測定する方法とがある。ひずみや加速度の代りに、これらの積分値である変位を直接測定すれば、一般に精度が高いと言われている<sup>(6)</sup>。しかし、変位を直接測定することは不動点の確保、作業の簡便性あるいは現象の高速性などによる技術的な問題が多い。

#### 3-2 変位計測例

近藤らは光学式変位計によるシステムを開発した<sup>(7)</sup>。杭に貼付したターゲットの明暗を光学的に捉えるものである。宇都らは高速度カメラを用いて杭頭変位を計測している<sup>(8)~(9)</sup>。打込み時の振動を避けるために、杭から30m程度離れて不動点を確保しなければならないという問題が両者に共通している。岩下らは、杭頭の加速度波形をデジタル処理して変位を求めるシステムの開発を進めている<sup>(8)</sup>。数値積分では、リアルタイムに変位を得ることは困難である。

#### 3-3 加速度のアナログ積分による変位計測

筆者らは、以上の諸手法の問題点を補うために、杭頭の加速度波形をアナログ的に積分処理を行ない、リアルタイムに変位を計測する手法を考案した。システムを図1に示す。

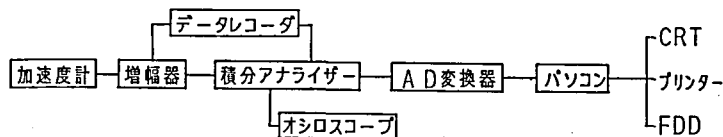


図1 変位計測システム

加速度計を杭に取付けるだけで、後は適当に離れた場所で変位波形が読み取れるので、安全かつ迅速に計測作業を進めることができる。

### 4. アナログ積分器

本研究で試作したアナログ積分器は、直流高利得増幅器を用いた演算増幅器によるものである。その基本回路を図2に示す。回路に入力電圧  $V_s$  が加わると、電流  $I_s (=I_f)$  が流れて、コンデンサ  $C_f$  を充電する。各部の電流は

$$I_s = (V_s - V)/R_s$$

$$I_f = C_f \frac{d(V - V_o)}{dt}$$

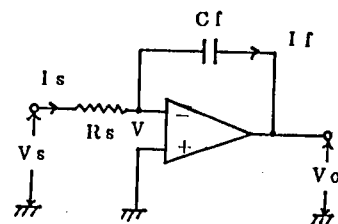


図2 基本回路

と表わされる。上式より、

$$V - V_o = \frac{1}{C_f} \int I_f dt = \frac{1}{C_f R_s} \int (V_s - V) dt$$

となる。Vはイマジナルショートにより  $V=0$  であり、結局出力電圧  $V_o$  は、

$$V_o = -\frac{1}{C_f R_s} \int V_s dt$$

となり、入力電圧  $V_s$  を積分した値に比例する。

実用の積分器回路を図3に示す。この回路ではコンデンサ  $C_f$  に抵抗  $R_f$  による負帰還を併用して動作点を安定化し、オフセット補償をしている。また各部のコンデンサおよび抵抗等の素子値の選択により、回路の発振防止を行い、また増幅度、使用周波数範囲等を適切な値に選定している。

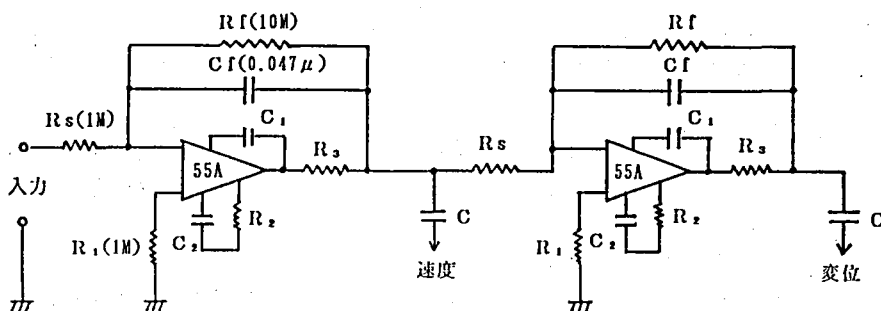


図3 積分器回路

こうした積分回路には種々の方式があるが、ここでは、ミラー積分器を2段カスケードに接続し、杭体に取り付けられた加速度計の出力を積分回路への入力として印加し、1段目で速度を、2段目で変位を検出するようにした。

積分器の周波数特性を図4に示す。本回路の特性は、図から明らかなように、およそ 14~300Hz の帯域で右下がりのこの配 (-20dB/dc) を有する直線性を示す。2段にカスケード接続した場合でも、およそ 15~150Hz の帯域で直線性が得られた。この -20dB/dc のこの配が積分要素のゲイン特性を示している。

杭体の動的な主要動の周波数は約 100Hz 前後であり、本回路は測定範囲を満足している。

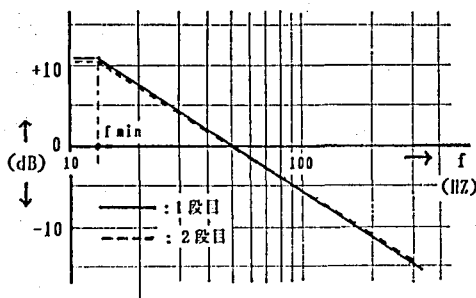


図4 周波数特性

## 5. 現場計測

### 5-1 現場概要

本システムの実用試験を試みたのは、長野県上水内郡豊野町の浅川排水機場建設現場であ

る。同排水機場建設に伴い、約450本の基礎杭が打たれ、それらの一部に実用試験を実施した。本現場は、千曲川の氾濫原に位置し、図5に示すような土質性状の地盤である。使用した杭はPHC $\phi$ 600 C種、杭打ち機はK-45(ラム重量4.5トン級)ディーゼルハンマーである。

### 5-2 計測方法

図6にセンサー取付図を示す。杭頭から2mの位置に、2個の加速度計(最大500g)と1個のひずみゲージを取付け、加速度波形と応力波形を同一断面において同時に計測した。計測した杭の断面諸元を図7に示す。本研究で試作した加速度計取付治具を図8に示す。

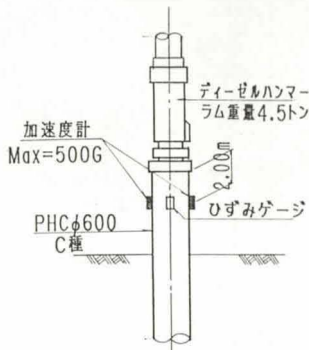


図6 センサー取付図

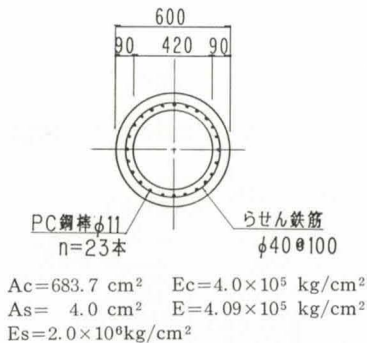


図7 PHC 杭断面諸元

Boring No.1

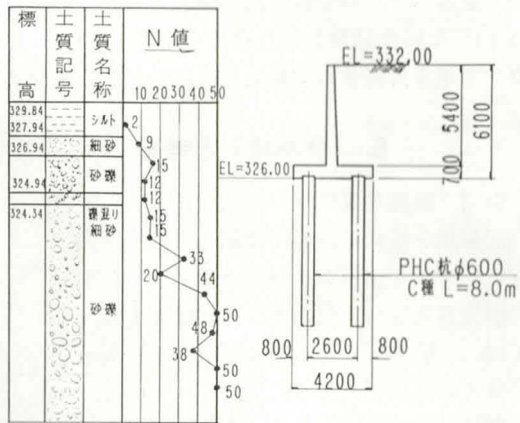


図5 土質柱材図

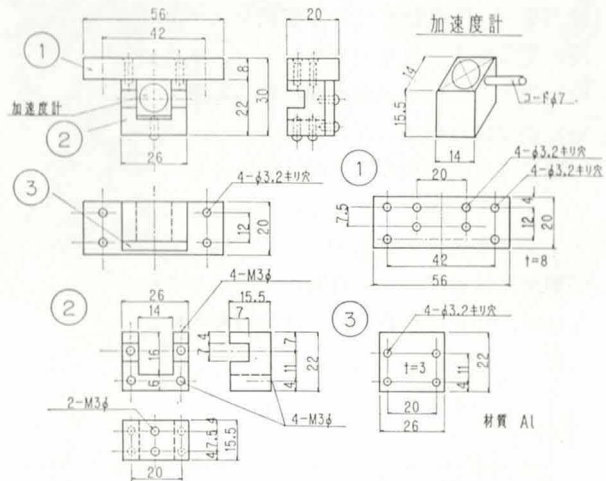


図8 加速度計取付治具

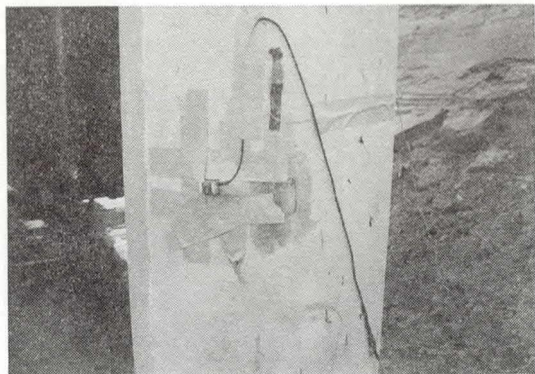


写真1 計測状況

慣性力を小さくするため軽量のアルミニウム合金を用いた。加速度計をはめ込んだ加速度計治具をガムテープで杭表面に密着させた。ひずみゲージは接着剤で貼付した。計測状況を写真1に示す。加速度計取付位置が地面より1.3~1.4mになるまで打込まれた後、貫入量とリバウンド量を計測する記録紙を杭に貼付し、本システムによる計測と同時にデータを採取した。

## 6. 計測結果と考察

### 6-1 計測結果

記録紙を杭に貼付して計測した結果を図9に示す。ディーゼルハンマーによる打撃の瞬間貫入量が一気に2.2~2.3cm生じ、1cmほどリバウンドし、結局1.2~1.3cmの貫入量が生じたように記録されている。

図10に計測波形を示す。杭の同一断面に相対して取付けた2個の加速度計a, bの波形をA/D変換して、数値積分により速度と変位を求めたものである。a, bの値の差異より、杭が鉛直方向にのみ運動しているのではないことが分る。

図11は、遮断周波数160Hzのローパスフィルターを通して計測した加速度波形をデジタル処理したものである。図10, 11の加速度波形は同一の打撃によるものではないが、図9に示される一連の打撃の中か

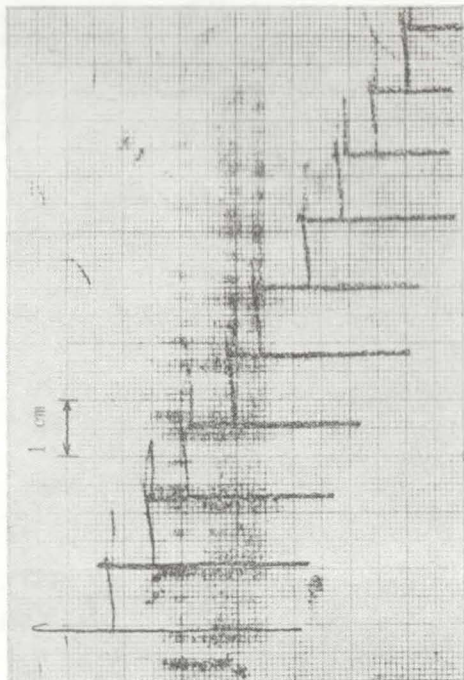


図9 記録紙による計測結果

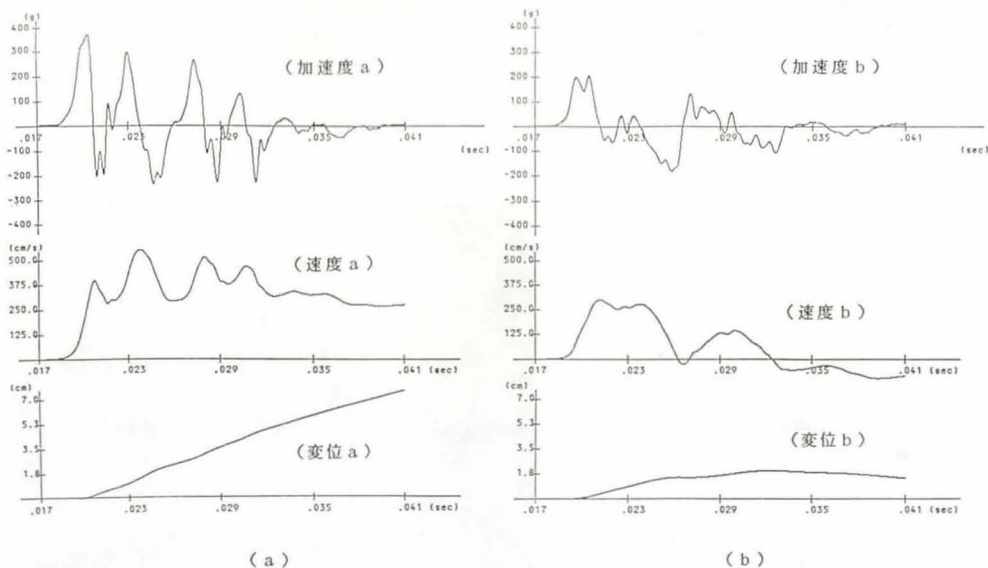


図10 計測波形(デジタル処理)



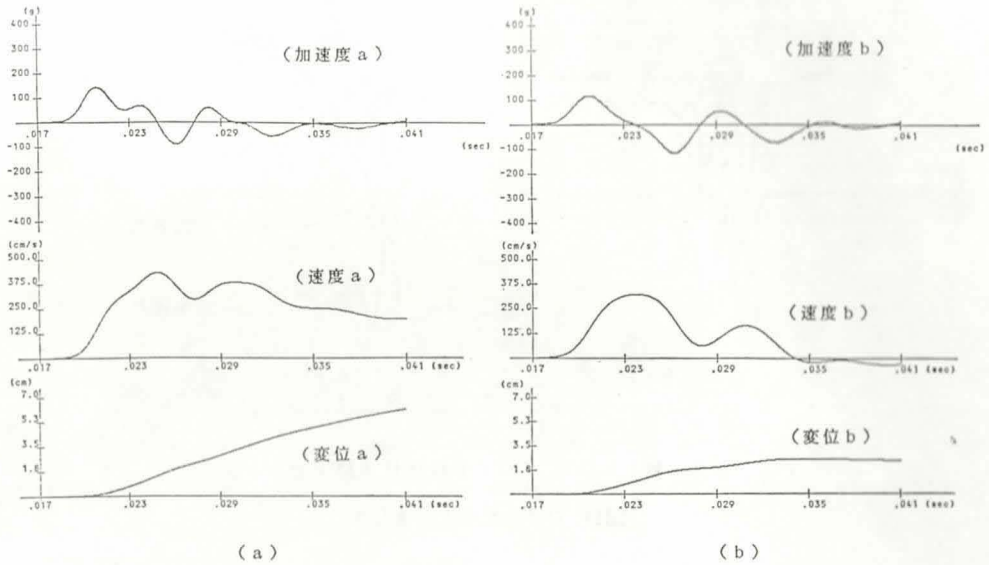


図11 計測波形 (160Hz以上カット)

ら得られたものである。図9の各打撃ごとの貫入量がほぼ一定であることを考えると、図10に見られる高周波の影響は変位には表われていないと見ることができる。

加速度計 a, b の数値積分結果を平均して図12に示した。1回の打撃による杭の主要動が約0.04sec 継続し、貫入量が約4cm 生じている。岩下らも指摘しているように<sup>(8)</sup>、杭のたわみが影響して大きな貫入値を示していると考えられる。

図13にアナログ出力結果を示す。加速度計 b についての出力例である。図11(b)のデジタル処理による変位に対応する波形であり、変位の大きさは同程度に得られている。

次に、ひずみゲージによる応力波形と加速度波形との対応関

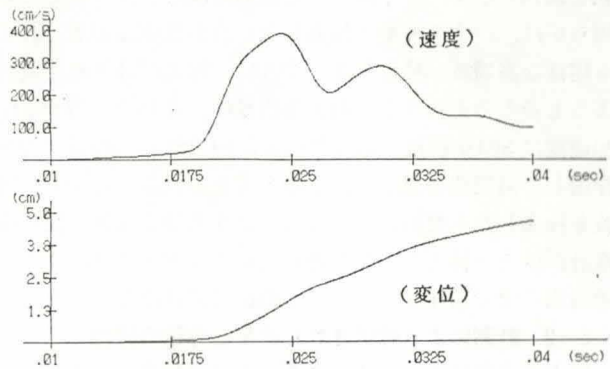


図12 平均値

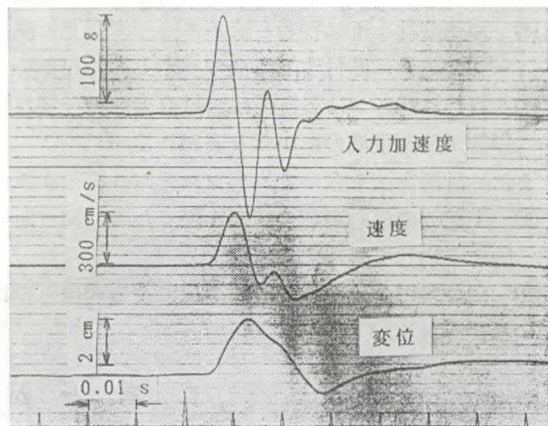


図13 アナログ出力結果

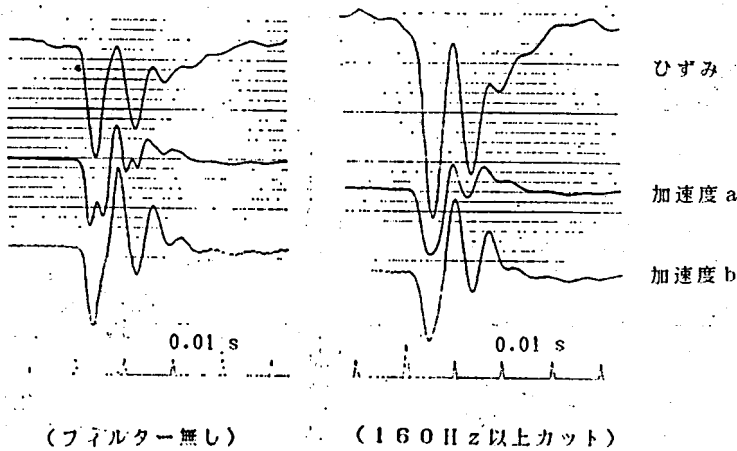


図14 ひずみ波形と加速度波形

係を図14に示す。フィルターで高周波成分をカットしていない左図の加速度 a の波形には、明らかに、ひずみ波形と対応しない高周波成分が表われている。図10の加速度波形 a, b にも同様な高周波が見られる。これは、加速度計と加速度計取付治具の質量に基づく慣性力によるものと考えられる。両者の質量は、合わせて約 60gf/g である。打撃時における杭体の加速度は 300 g 程度であったので、約 18kgf の慣性力が加速度計を貼付したガムテープに作用し、高周波が発生したものと考えられる。しかし、図14の右図に見られるとおり、高周波を除去した主要動については、ひずみ波と加速度波の位相がきれいに一致しており、加速度計が杭と一体となって運動していることが分る。また、高周波の影響について、図10, 11の説明の所で前述したようにこの高周波はほとんど変位波形に影響を及ぼさない。

#### 6-2 計測により確認された成果と今後の課題

以上の考察により、次のようなことが結論される。

- (1) 本システムにより、リアルタイムに杭の挙動を計測することができた。
- (2) 加速度計を杭に密着させるには、本研究で試作した加速度計取付治具を市販のガムテープで杭体に貼付する方法で実用上問題が無いと思われる。
- (3) 打込み時における杭体は、鉛直方向の様な運動ではなく、偏心した変形をし、その影響が加速度波形にかなり表われる。

また、計測方法を含めて、本システムは次のようなことがらを改善すべきであると考える。

- (1) 上記(3)の偏心運動の影響を除くため、同一断面に4個の加速度計を取付け、アナログ的に平均して処理する。
- (2) 積分器による変位と数値処理による変位との比較をもとに、両者の対応性を検討する必要がある。

## 7. あとがき

今回試みた計測システムは、改善が多々必要ではあるが、アナログ積分によるリアルタイ



ム処理は、現場で十分有益な手段となり得ると確信できる。杭打が実物大のペネトレーティング試験であるとの観点に立てば、その計測技術の信頼性向上は大変大きな意味を持つことは論を待たない。また、静的载荷試験の実施困難な小規模工事や、海洋における杭打工事においては特に、杭の支持力推定の精度を高めることが必要とされる。種々の低騒音型の杭の施工法が採用されているが、打込み施工のメリットは多く、ばらつきの少ない支持力が得られることは周知のとおりである。

将来、より精度の高い、信頼性のあるデータ採取が可能となれば、杭の周面摩擦や地盤のバネ定数を考慮した、支持機構の解明が可能となるので、今後、更に計測技術の向上を目指したいと考える。

謝辞 現場計測に種々便宜をおはかりいただいた、長野県長野地方事務所防災第一課の尾崎俊之主査ならびに西松・大本・守谷共同企業体の土岐 崇所長、畔上謙治主任、込山 章主任、(株)守谷商会技術研究所の柳沢洋一所長はじめ関係各位に心から感謝申し上げます。また、計測方法についてご指導いただいた(株)大林組技術研究所の近藤次郎氏、テストデータの処理でお世話になった本校電気工学科大澤幸造先生ならびに、卒業研究でご協力いただいた(株)名工建設の丸山 剛氏に深く感謝申し上げます。

## 考 考 文 献

- (1) 宇都, 冬木: 波動理論に基づいた杭の動的支持力算定式の提案, 第14回土質工学研究発表会, 1979
- (2) 宇都, 冬木: 波動理論に基づいた杭の打止め管理式, 第15回土質工学研究発表会, 1980
- (3) 宇都, 冬木: 打込み杭のリバウンド測定値の補正方法, 第16回土質工学研究発表会, 1981
- (4) 宇都, 冬木他: 杭の打止め管理式の再検討, 第17回土質工学研究発表会, 1982
- (5) 宇都, 冬木他: 杭打ち公式に関する波動論的考察, 第18回土質工学研究発表会, 1983
- (6) 土質工学会: 杭基礎の設計法とその解説
- (7) 近藤他: 光学式変位計による打込み杭の挙動計測, 大林組技術研究所報 No. 27, 1983
- (8) 岩下他: 打込み杭施工管理システムの基礎研究, 第21回土質工学研究発表会, 1986