

# 角速度センサを用いた既存地中埋設杭の 損傷検知システムの研究

曾根彰<sup>1</sup>・増田新<sup>2</sup>・小山泰平<sup>3</sup>・山田真<sup>4</sup>・山本鎮男<sup>5</sup>

<sup>1</sup>工博 京都工芸繊維大学教授 機械システム工学科 (〒606-8585 京都市左京区松ヶ崎御所海道町)

<sup>2</sup>工博 京都工芸繊維大学助手 機械システム工学科 ( 同 上 )

<sup>3</sup>京都工芸繊維大学大学院生 機械システム工学専攻 ( 同 上 )

<sup>4</sup>工博 早稲田大学教授 理工学総合研究センター (〒162-0044 東京都新宿区喜久井町17)

<sup>5</sup>工博 早稲田大学客員研究員 理工学総合研究センター (〒169-0072 東京都新宿区大久保3-4-1)

In this paper, the new system to detect the cracks occurred in the pile is presented. We give the elastic wave from the ground surface, then the bending deformation of pile is occurred. We analyze the acceleration or angular velocity at the pile top or the pile in the underground. In this study, we proposed the analysis method in the cases of the existing pile and newly constructed pile. In the analysis, we carried out the experiment using the pile model and the sand box and simulation using FEM method, and the effectiveness of this method is confirmed.

**Key Words :** Health monitoring, Damage detection, Pile, FEM analysis, Angular velocity

## 1. 緒言

宮城沖地震(1978)では、建築物を支持していた埋設杭の損傷が地震後に大きな問題となったし、阪神大震災(1995)においても公共施設を支持していた埋設杭の損傷が、地震後の復興を行う際に重大な課題を呈した。地震時には、地盤は変形し構造物はスウェイとロッキング動をするために埋設杭は過大な曲げ変形を受けて損傷する可能性がある。しかし、埋設杭は地上の構造物のように損傷を目視あるいは検査することができないので、その損傷の程度を把握することができない。その損傷を把握するためには、これを掘り返してみるより方法がない。地震後の復興において、地中埋設杭の将来に向かっての使用の可否を決めるために、その損傷の検知が切望される。阪神大震災の後で、杭の頭に垂直に衝撃を与えて、波動の反射を計測して損傷を調べる試みもなされた様だが、よい結果が得られなかったと聞いている。杭頭からの衝撃は損傷(クラック)が、平時では密着しているので適切な波動インピーダンスを呈しておらず、反射波が損傷の情報を正しく含んでいないことが原因と思われる。

本研究では杭の近傍の地表面に重錘を落下し、それによって生じた波動が杭に土圧を与えて杭に曲げ変形を惹起せしめ、その動きを杭頭に設置した角速度センサと加速度センサの観測値より、地中に埋設された杭の損傷を検知することを試みた。FEMによ

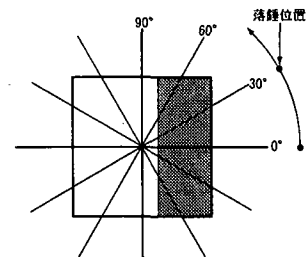


図-1 亀裂方向の調べ方

るシミュレーションと砂箱を用いた実験を行った結果、両者に整合が見られるので実用に供しうものと思われる。なお、地中の杭の動きを調べる目的で、地中の杭に沿って角速度センサを配置した場合について、シミュレーションと実験を行ったので、その結果を付録に載せた。もしも新設時に杭に沿って角速度センサを配置することができれば、損傷の検出は十分な精度でできることを示した。

## 2. 既存埋設杭の損傷検知システムの概要

今回提案するシステムは、(1)、(2)に述べる順序で行われる。

### (1) 損傷の有無と損傷の平面位置の探索

図-1に損傷の疑いのある杭の平面図を示した。

杭の中心を左回りに 30 度づつ分割して、その分割線の延長上に、重錘を落下する。そして、杭頭でそれぞれの分割角度に応じて角速度を検出する。その角速度の最大値を縦軸にとり、横軸を分割角度に対して図示すると、もし損傷があるならばその位置で最も低い値をとる。なぜならば、損傷があると杭に作用する衝撃波によって発生する振動土圧のエネルギーの伝達が損傷によって途切れるので、杭頭の角速度が最小になるからである。この損傷があると認定された角度の位置を改めて 0 度に設定すると、その 90 度の方向は、後述のようにほぼ健全の時の角速度が検出されると思われる。

表-1 杭に生じた亀裂

亀裂の位置 (mm)	200	400	600
亀裂の深さ (mm)	4	4	4
亀裂の幅 (mm)	8	8	8
亀裂の幅 (mm)	2	2	2

表-2 材料特性

	地盤モデル	杭モデル
ヤング率 $E$ [ $N/m^2$ ]	$2.61 \times 10^7$	$2.05 \times 10^{11}$
ポアソン比 $\nu$	0.45	0.3
密度 $\rho$ [ $kg/m^3$ ]	$1.4 \times 10^3$	$7.8 \times 10^3$

## (2) 損傷の深さとその上下方向の位置の探索

前項で述べたように損傷によって振動土圧の伝達が阻止されるために杭頭での角速度は小さくなる傾向にある。そして、その傾向は損傷の深さに比例すると思われる。次に損傷の深さと関連だが、土中では、上載荷重に比例して弾性拘束が大きくなるので、深い位置での損傷ほど振動土圧の影響を強く受ける。また杭頭の変位について考えると、損傷の深さに伴って損傷の位置でヒンジ状になり杭に剛体変形が生じると思われる。従って、これに伴い杭頭での変位は、損傷の深さに比例して増加すると考えられる。

このように、現象について物理的説明ができるので、シミュレーションと実証実験の整合性が確認できれば、実物について野外実験とシミュレーションの両者の有機的な連携によって埋設杭の損傷検知をすることができる。

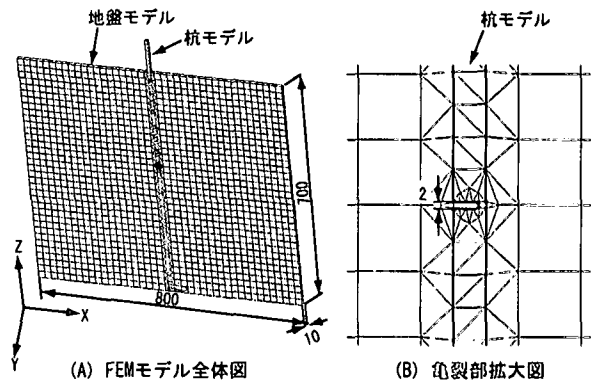


図-2 FEMモデルと亀裂部拡大図

## 3. FEMシステムによるシミュレーション

### (1) 解析に用いた杭モデルの種類

本研究では、亀裂の位置・深さにより杭モデルがどのような挙動を示すかをできるだけ正確に調べるため、様々な亀裂の入った杭モデルを用いた。杭に生じたとする亀裂の種類を表-1に示す。亀裂の位置は杭モデルの根元(岩盤に刺さっている方)からの距離、亀裂の深さは杭の表面から水平方向に入り込んだ深さ、亀裂の幅は亀裂の垂直方向の高さである。そして、6種類の亀裂モデルと亀裂のないモデルを合わせて計7種類の杭モデルについてシミュレーションと実験を行った<sup>1)</sup>。

### (2) FEMモデル

地中埋設杭のFEM解析を行うにあたって、本研究では汎用FEM解析ソフト、ANSYSを用いた。シミュレーションで用いたFEMモデルを図-2に示す。シミュレーションで用いた杭モデルは10 mm×10 mm×800 mmの角柱である。地盤部分にはy方向に厚みがないが、これは伝播する波動「P波、S波、Rayleigh波、Love波」の中で地盤の厚み方向に関与するLove波の影響は杭にあまり及ぼさないため、

このようなFEMモデルでも十分であると判断したからである<sup>2)</sup>。地盤部分が少なくなった分、地盤モデルはより細かい要素分割が可能となり、計算時間も大幅に短縮された。また、亀裂部拡大図からわかるように、FEMモデルでは亀裂の中は空洞とした。これは、実際の亀裂では地盤が亀裂の中に完全に埋まるようになるとは考えられず、どちらかといえば、亀裂の中は空洞となっているほうがより実際の状況に近いと思われるからである。また、要素分割には四面体、六面体形状を用い、杭モデルでは一つの要素の一辺が最大10 mm、地盤モデルは最大20 mmになるようにした。亀裂位置400 mm、亀裂深さ4 mmの場合で、要素数3083、節点数3511である。

#### a) 境界条件

境界条件は、杭の根元は地中深くの強固な支持基盤に刺さっていることより、固定とした。砂箱の壁にあたる部分は壁に対して垂直方向には変位せず、壁と水平な方向には動けるようにした。また、全ての要素に対して、y方向の変位、x軸回りの回転、z軸回りの回転の自由度を拘束した。これにより、波動はx方向のみに伝播する2次元モデルと同じ条件となっている。実験用の砂箱モデルは3次元であるが、波動の進行方向に対して横方向に振動しながら地表面を進むLove波の影響はほとんど杭に及ぼさないと考えられるので、シミュレーションは2

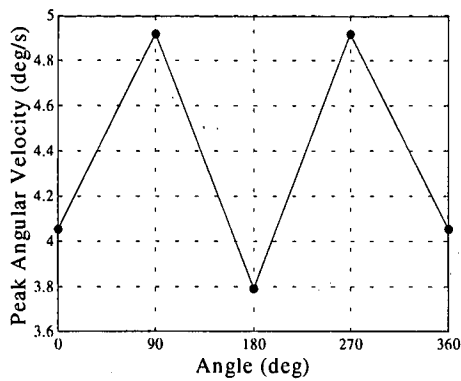


図-3 落錘位置の変化による角速度ピーク値の変化

次元モデルで特に問題はないと思われる。また、砂箱実験装置と同じ条件になるように-Z方向に  $9.8 \text{ m/s}^2$  の重力場を設定した。

b) 材料特性

本研究の目的はシミュレーションと実験が一致することなので、特に相似則などは考慮せず、地盤には乾燥砂、杭モデルには鋼材を用いた。各材料特性を表-2に示す。

(2) シミュレーション環境

杭に曲げ変形を起こさせるために、地盤表面に集中荷重をインパルス的に加えなければならない。その方法は、杭から200 mm離れた位置に 0.0001 秒～0.0011 秒の 1 ms 間だけ 100 N の力が加わるようにした。計測時間は0～0.015 秒、サンプリング周波数は 10 kHz、またモーダル減衰も考慮した。

(3) シミュレーション結果

a) 損傷の有無と損傷の平面位置の探索

2. (1)節で示した方法をFEM解析で行った結果を図-3に示す。亀裂位置 200 mm、亀裂深さ 8 mm の場合の結果である。FEM解析では、杭を角柱としたので 30 度ごとにモデルを作るのが大変であったため、0 度、90 度、180 度、270 度、360 度で行った。先に示した物理的説明と同じ結果が得られた。この結果より亀裂の有無の判断と、亀裂方向を検出することができる。

b) 亀裂位置 90 度方向の剛性

既存杭の場合、一番問題となるのは健全杭のデータが存在しないということである。そこで、健全杭のデータを何か他のデータで補うため、亀裂位置 90 度方向のデータを健全杭のデータとして用いることを考案した。亀裂位置 90 度方向のデータが健全杭とあまり変わらないことを確認するため、亀裂位置 90 度方向の剛性を調べた。

亀裂位置 90 度方向が亀裂のないものと剛性にどのくらい差があるのかを杭のばね定数  $k$  を用いて調べた。方法は、図-4のように亀裂の入った杭の下端を固定して杭頭に 0 度、90 度方向から静荷重を

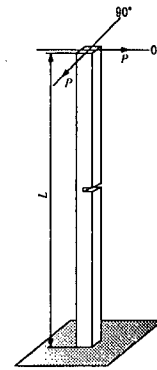


図-4 杭のばね定数の求め方

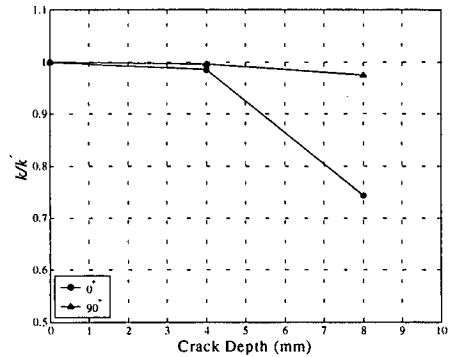


図-5 剛性比(亀裂位置 400 mm)

加える。そのときの杭頭の変位  $x$  は、

$$P = kx$$

より、

$$k = \frac{P}{x}$$

この剛性  $k$  を用いて 0 度方向の剛性  $k$  と 90 度方向の剛性  $k'$  の比  $k/k'$  を調べて、図-5に示す。図を見るとわかるように、0 度方向は亀裂深さが増すにつれて剛性比は減少していくが、90 度方向は亀裂深さが増してもほとんど変化しない。従って亀裂位置 90 度方向の剛性は健全杭とあまり変わらないことが確認された。またこの結果より健全杭のデータがない場合、亀裂位置 90 度方向のデータを健全杭のデータとして用いることができる。

c) 杭頭データによる評価

この方法は、集中荷重を亀裂位置 0 度方向の杭から 200 mm 離れた左側のところに加え、地盤を伝播した波動により杭モデルに曲げ変形を起こし、その時の杭頭の角速度・変位を調べる。そして、亀裂位置 90 度方向のデータを健全杭のデータとみなし、それと比較することにより、亀裂の位置・深さを推定する。なお、この方法では杭頭のデータのみを用いているので、新設杭への対応でも可能な方法である。図-6に各亀裂位置における角速度ピーク値、変位ピーク値を示す。例えば、亀裂位置 200 mm では杭頭角速度は亀裂深さが増すにつれて減少するが、変位はほとんど変化しない。逆に亀裂位置 600 mm

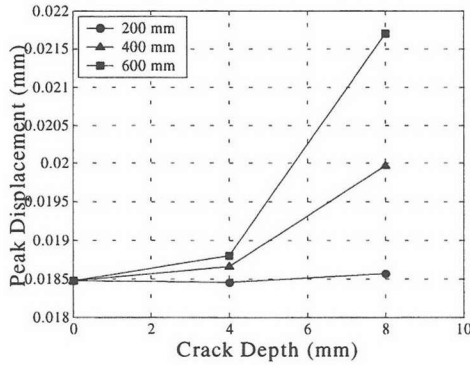
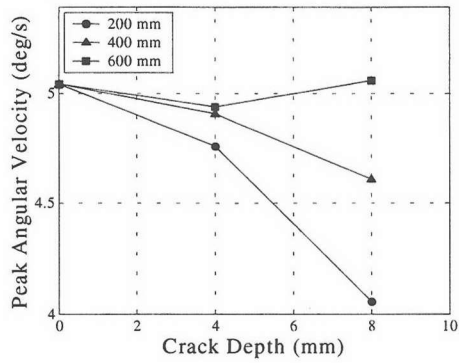


図-6 角速度ピーク値と変位ピーク値

ではその逆の現象が見られる。従って、この角速度ピーク値と変位ピーク値の両者の変化を調べ、それらの変化が図と一致する場所が亀裂位置・深さとなる。

#### 4. 砂箱を用いた実証実験

##### (1) 実験概要

##### a) 砂箱実験装置

本研究の目的は、実験結果とシミュレーション結果が一致することなので、シミュレーションで用いた FEM モデルをできるだけ忠実に再現した砂箱実験装置を製作した。実験装置全体図を図-7に示す。砂箱の大きさは実験で使う砂箱の大きさにシミュレーションで用いた FEM モデルの大きさを合わせているので、FEM モデルと同じ大きさである。砂箱の幅は 300 mm としている。砂箱の壁による波動反射の影響が起きてしまうが、シミュレーションモデルと同じ大きさにしなければならないのでこの大きさとした。また、砂箱の境界にあたる壁には厚さ 15 mm のベニヤ板を用いている。従って、シミュレーションのように壁と垂直方向に完全な自由度のない境界とはなっていない。杭モデルの下部は図-8のように、アングルとボルトで完全に固定している。集中荷重を作用させる方法は、砂箱上部側面に蝶番で連結したベニヤ棒の先に円錐状の突起を取り付け、またその上部には調節可能な重りが乗せてあり、これをある一定の角度から落とすことにより毎回正確に同じ位置に同じ力でインパルス力を加えることができる

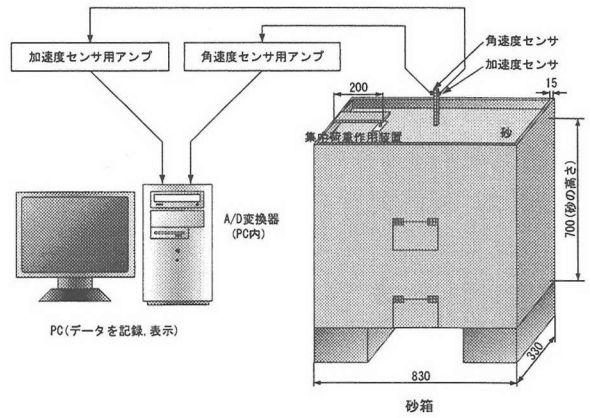


図-7 砂箱実験装置

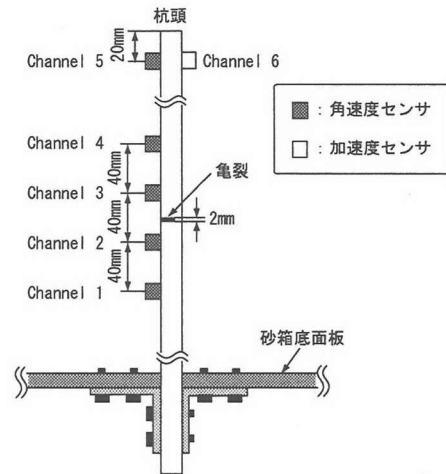


図-8 センサ配置図

表-3 材料特性

杭モデル	
材料	SS400 (鋼材)
密度	$7.8 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )

地盤モデル	
材料	天然珪砂 5 号
密度	$1.5 \times 10^3$ (kg/m <sup>3</sup> )
状態	乾燥
せん断波の速度	80 (m/s)

ようになっている。また、インパルス力が加わる地盤のほうには、そのまま重りを落下させると地盤に沈みこんでしまうため、鉄片の中心にボルトを通したものを地盤表面に置いている。そして、重りと地盤上のボルトが垂直にぶつかるように設計した。

##### b) 材料特性

杭・地盤モデルの材料特性を表-3に示す。地盤モデルの材料特性は実験した結果である。これらの材料特性をシミュレーションにも用いている。

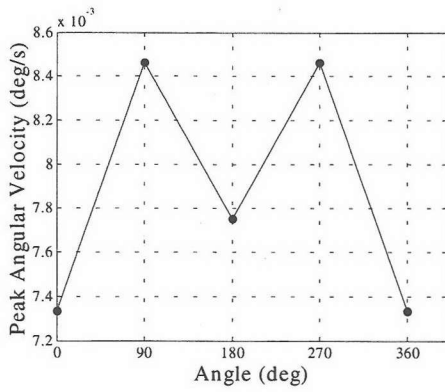


図-9 落錘位置の変化による角速度ピーク値の変化

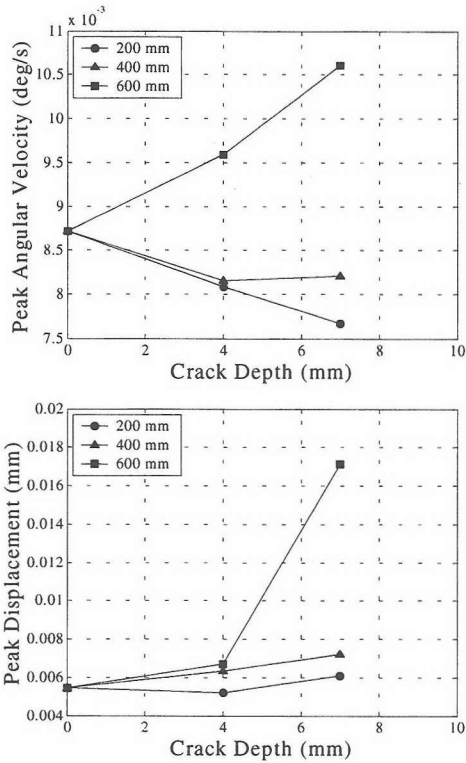


図-10 角速度ピーク値と変位ピーク値

## (2) 実験結果

### a) 損傷の有無と損傷の平面位置の探索

FEM解析で行っていた落錘位置の変化による角速度ピーク値の変化を図-9に示す。図からわかるようにFEM解析結果とよく整合している。従って、この手法は実験でも可能であることが確認された。

### b) 杭頭データによる評価

FEM解析で行っていた杭頭角速度ピーク値と杭頭変位ピーク値を図-10に示す。FEM解析結果と比較すると角速度ピーク値では亀裂位置 600 mm のデータが大きく増加している。これは、実験では亀裂位置が地表面に近いほうがよく波動の影響を受けやすいからだと考えられる。変位ピーク値では亀裂位置 400 mm の場合が FEM 解析結果と少し異なる。しかし、全体的な変化は FEM 解析と一致しており、シミュレーションと実験がよく整合された結果だといえる。

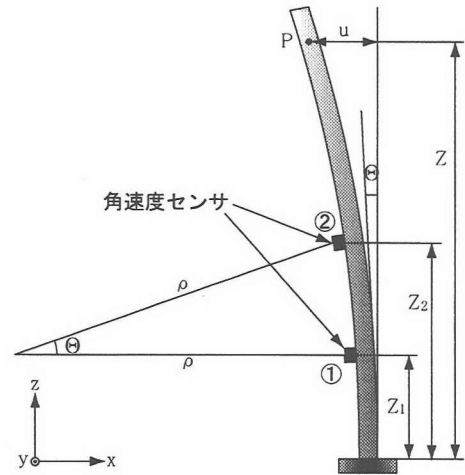


図-11 角速度センサを用いた曲率の計測法

## 5. 結び

本研究では、地中埋設杭に発生した亀裂・損傷を検知するために、角速度センサに着目し、地盤表面から弾性波を与え、地盤を伝播した波動により杭に曲げ変形を起こし、それによって変化する角速度・変位を捕らえることにより亀裂位置・深さを推定する手法を考案した。集中荷重作用位置を変化させることにより、亀裂方向と亀裂の有無を推定し、次に亀裂位置 90 度方向のデータを健全杭のデータとすることにより、杭頭の角速度・変位を評価し、亀裂の位置・深さを推定した。また、FEM解析と実証実験がよく整合しているため、本手法がシミュレーションだけでなく、実験でも可能であることも確認された。従って、本研究により本手法の亀裂検知システムの基本的な部分は確立された。

## 付録

ここでは、地中の杭の動きを調べるために、角速度センサを杭地中部に取り付け、センサ間の曲率を評価することにより亀裂位置を推定した。この方法は、杭を新設する場合に用いることができるので、亀裂位置を推定する有効な手法と考えられる。

### (1) 曲率による評価方法

ここでは、曲率の計測法について説明する<sup>3)</sup>。図-11は z 方向に伸びた梁状構造物の一部分の断面図で、変形前に表面が z 軸に平行であったものが y 軸周りの曲げモーメントを受けて曲げ変形をしている状態を示す。この表面に 2 個の角速度センサ 1、2 を近接して配置し、曲率を計測する。なお、梁の表面とは梁の断面上の表面、つまり線分をあらわすものとする。梁上部の P 点での角速度  $\Omega$  は構造物全体の角速度を  $\Omega_0$  とすると、

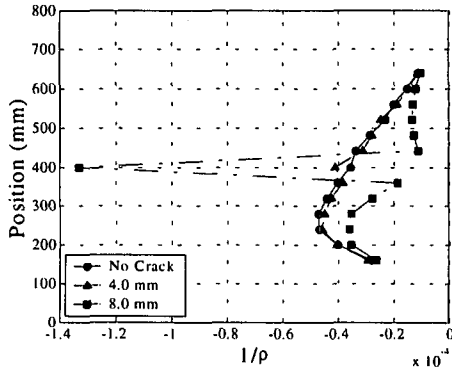
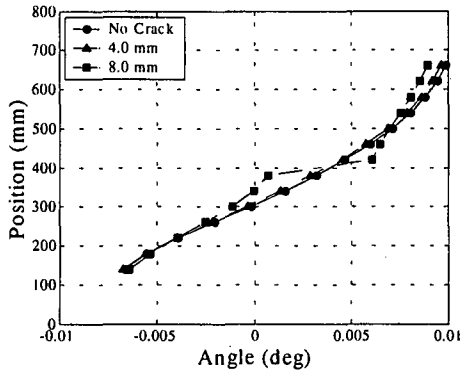


図-12 曲率変化(FEM)

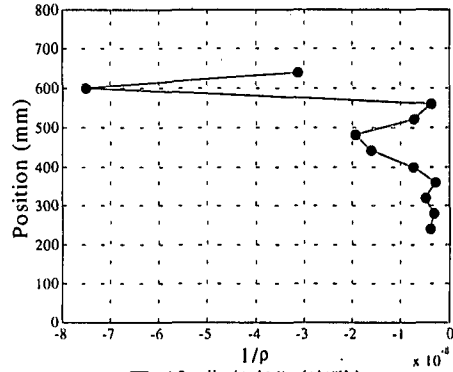
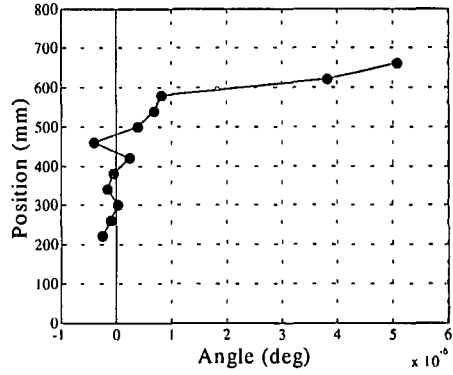


図-13 曲率変化(実験)

$$\Omega = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \Omega_0 = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \Omega_0 \quad (1)$$

曲率半径  $\rho$  は  $\theta$  が小さいとすると、式(1)を考慮して、

$$\frac{1}{\rho} \approx \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial t} \int (\Omega - \Omega_0) dt \quad (2)$$

ここで、図-11のように2つの角速度センサを設置した場合を考える。センサ1, 2の位置を  $Z_1, Z_2$ 、角速度を  $\Omega_1, \Omega_2$  とする。また、2つのセンサ間隔を  $\Delta = Z_2 - Z_1$  とする。1対の角速度センサ間の曲率  $1/\rho$  は、

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} &= \frac{1}{\Delta z} \left( \int (\Omega_2 - \Omega_0) dt - \int (\Omega_1 - \Omega_0) dt \right) \\ &= \frac{1}{\Delta z} \int (\Omega_2 - \Omega_1) dt \end{aligned} \quad (3)$$

従って、系全体の角速度がキャンセルされ、1対の角速度センサ間の曲率が求まる。もし、センサ間に亀裂が発生すると、曲率半径  $\rho$  は小さくなるので、曲率  $1/\rho$  は大きくなる。従って、亀裂を挟んでいるセンサ間の曲率だけが他より大きくなるので、亀裂位置を検知することができる。

## (2) 曲率による評価

FEM解析では角速度センサを40 mm 間隔で14個設置した場合を想定してシミュレーションを行った。図-12に亀裂位置400 mmにおける杭頭変位ピーク時の曲率変化を示す。上図が角度変化、下図が曲率変化である。図からわかるように亀裂位置で曲率が大きく変化していることがわかる。実証実験では、角速度センサを40 mm 間隔で12個取り付け付けた亀裂位置600 mm、亀裂深さ8 mm の場合の結果を図-13に示す。この場合も亀裂位置で大きく曲率が変化している。従って、この手法は新設時に杭側面に角速度センサを取り付けることが可能であれば、亀裂位置を知る有効な手法となることが確かめられた。

## 参考文献

- 1) 松浦孝, 角速度センサを用いた地中埋設杭の亀裂・損傷検知システムに関する基礎研究, 京都工芸繊維大学平成12年度卒業論文, 2001.
- 2) 日本建築学会, 入門・建物と地盤の動的相互作用, 日本建築学会, 1996.
- 3) 山地邦裕・山本鎮男・曾根彰・増田新・田村雅巳, 振動ジャイロを用いた角速度センサによる亀裂進展の監視, 日本機械学会論文集C編, 65-635, pp.2750-2755, 1999.