

既存地中埋設杭の 損傷検知に関する研究

曽根彰¹・増田新²・鷲田公平³・山田真⁴・山本鎮男⁵

¹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)

²工博 京都工芸繊維大学助教授 機械システム工学科 (同 上)

³京都工芸繊維大学大学院生 機械システム工学専攻 (同 上)

⁴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)

⁵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, a non-destructive damage evaluation procedure is presented, which aims at detecting early or fatal cracks in existing piles after severe earthquakes. The bending motion of a target pile excited by an impulsive load, which is induced by hammering at the ground surface nearby, is measured at the top to obtain the dynamic compliance of the pile in one direction. Experiments show that evaluating the dynamic compliance in every direction can suggest the severity of the cracks as well as their location and orientation.

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り、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ク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生じさせ、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¹⁾。まず、砂箱を用いた縮小模型による実験を行い、この手法の有効性を検討した。

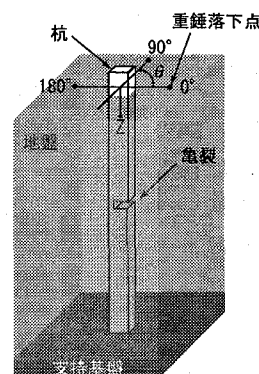


図-1 亀裂有無の調べ方

2. 既存埋設杭の損傷検知システムの提案

今回提案するシステムは、以下の(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

一番最初に調べなければならないことは、亀裂の有無である。これを調べるために、重錘落下位置の変化により杭頭データにどのような変化が生じるかを調べる。図-1に損傷の疑いのある支持杭を示した。図のように杭に亀裂の入っている方向を0度方向とし、それと直角方向を90度方向と定義する。そして、重錘落下位置を亀裂向き0度、90度、180度方向と変化させ、それぞれの位置での杭頭の角速度の最大値を調べる。もし杭に損傷のある場

合、亀裂の向きにより角速度の最大値が変化する。このことから損傷の有無が判断できる。またその時重錘落下位置が亀裂向き0度方向のときの角速度最大値が最も低い値をとる。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度と設定すると、その90度方向は、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。

(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。次に損傷の位置との関連だが、土中では、上戴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。

3. 有限要素法を用いたシミュレーションによる杭の静解析

(1) 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、亀裂向き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。亀裂向き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、FEM解析を用いて、亀裂向き90度方向の剛性を調べた。

まず解析に用いた杭モデルは、図-2に示すような実験の杭モデルと同じ形状の10mm×10mm×800mmの角柱で、亀裂のないモデルと亀裂のあるモデル合計7種類である。その杭に生じたとする亀裂の種類を表-1に示す。この亀裂の種類は、実験の杭モデルと全く同じである。またその亀裂部の拡大図も図-2に示す。

亀裂向き 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-3 のように亀裂の入った杭の下端を固定して地盤のない空中状態で、杭頭に 0 度、90 度方向から静荷重 P を加える。そのときの杭頭の変位を x とすると、ばね定数 k は、式 (1) のようになる。

$$k = \frac{P}{x} \quad (1)$$

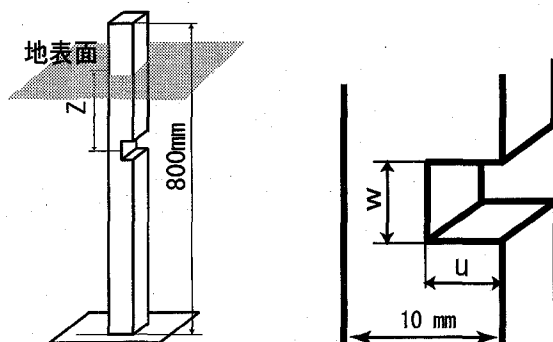


図-2 杭モデル及び亀裂部拡大図

表-1 杭に生じた亀裂

亀裂位置 Z(mm)	100	100	300	300	500	500
亀裂深さ U(mm)	4	8	4	8	4	8
亀裂幅 W(mm)	2	2	2	2	2	2

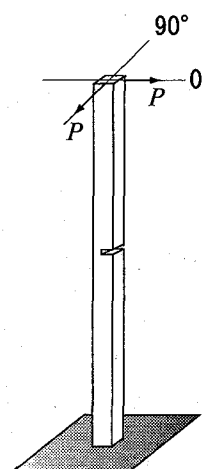


図-3 杭のばね定数の求め方

この剛性 k を用いて 0度及び90 度方向の剛性 k と亀裂のない杭の剛性 k' の比 k/k' を調べた。その剛性比を図-4に示す。図は、亀裂位置300mmの場合である。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。従って亀裂向き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、亀裂向き90 度方向のデータを健全杭のデータとして用いても問題は無い事がわかる。

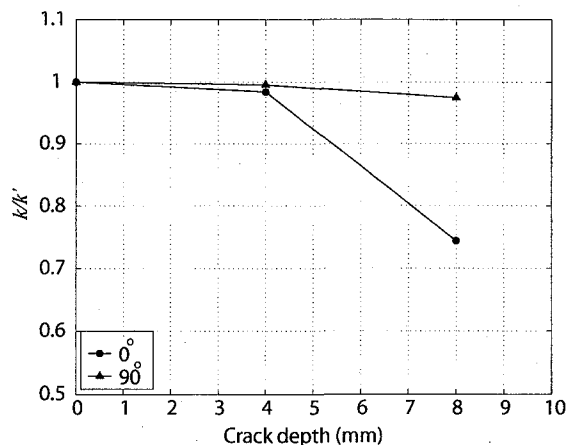


図-4 剛性比(亀裂位置 300 mm)

4. 砂箱を用いた実証実験

(1) 実験概要

a) 砂箱実験装置

実験装置全体図を図-5に示す。砂箱の幅は300 mmとしている。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。杭モデルの下部は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錘が乗せてあり、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、重錘と地盤上のボルトが垂直にぶつかるように設計した。

センサの位置については、図-6のように杭頭から20mmの位置で亀裂の向いている面に角速度センサを、それとは反対の面の同じ位置に加速度センサを取り付けた。図-5に示すように各センサで検出された信号は各専用のアンプで増幅され、パソコン内のA/Dボードによりアナログ信号に変換され、パソコンで記録される。その計測条件を表-5に示す。今回加速度センサ、角速度センサで計測したデータは高周波のノイズが生じるため、データ処理時に500Hzのローパスフィルタを通して処理を行った。

b) 材料特性

杭及び地盤モデルの材料特性を表-6に示す。地盤モデルの密度は、実際に計量カップに地盤モデルを押し固めて入れて、計算して求めた値である。

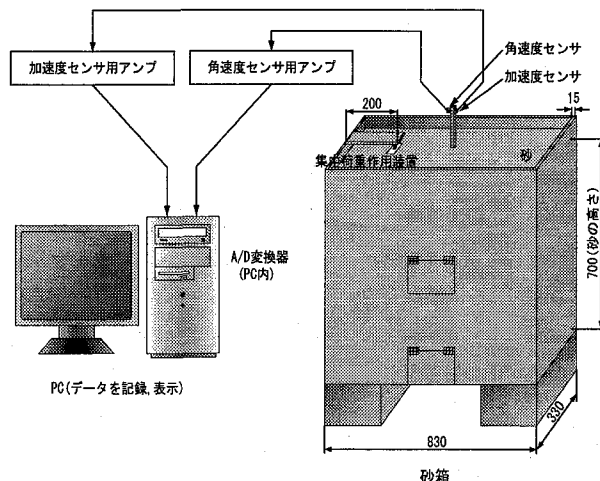


図-5 砂箱実験装置

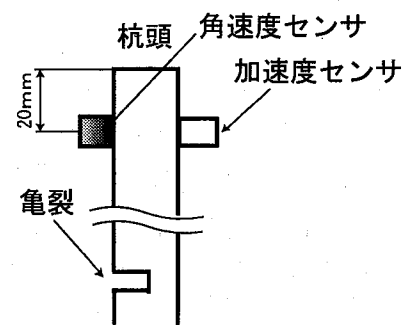


図-6 センサ配置図

表-5 計測条件

サンプリング周波数	20 k Hz
重錘の重さ	0.6kg
落下の高さ	0.2m

表-6 材料特性

杭モデル	
材料	SS400 (鋼材)
密度	7.8×10^3 (kg/m ³)
地盤モデル	
材料	天然珪砂 5 号
密度	1.55×10^3 (kg/m ³)
状態	乾燥

(2) 実験結果

a) 損傷の有無と損傷の平面位置の探索

2. (1)節で示した方法を実験で行った。その実験方法としては、図-5 のように重錘落下装置を用いて杭から 200mm 離れたところに集中荷重を加え、地盤に弾性波を与え、その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ピーク値を調べる。重錘落下位置を杭に対して 90 度ごとに変化させるのだが、実験装置の形状の問題上、直接重錘落下位置を変化させることができないので、かわりに杭モデルを回転させて固定し亀裂の向きを変化させることによって、重錘落下位置を変化させた状態として実験を行った。まず亀裂位置 $Z=300\text{mm}$, 500mm で亀裂深さが $U=4\text{mm}$ の杭の亀裂向き 90 度方向の杭頭の角速度波形と健全杭の杭頭の角速度波形を図-7 に示す。この図からもわかるように、二つの波形はほとんど似ており、この結果からも亀裂向き 90 度方向のデータを健全杭のデータとして用いても問題は無い事が確認できる。次に重錘落下位置を亀裂向き 0 度, 90 度, 180 度方向と変化させ、それぞれの位置での杭頭の角速度のピーク値（振幅の絶対値）を調べた。その結果を図-8, 図-9 に示す。これら図は、亀裂位置 $Z=300\text{mm}$, 500mm の亀裂深さ $U=4\text{mm}$ の場合の結果で、図-7 に示す角速度の時刻歴波形の 0.004 秒付近と 0.008 秒付近のピーク値で評価したものである。これらの結果から先に示した物理的説明と同じ結果が得られたことが確認できる。0.004 秒付近の亀裂位置 $Z=300\text{mm}$ の場合では、亀裂向き 0 度と 90 度方向のピーク値の差が小さくわかりにくい。0.008 秒付近のピーク値で評価した場合は、亀裂位置 $Z=300\text{mm}$, 500mm とも亀裂向き 0 度方向と亀裂向き 90 度方向のピーク値の差が大きくでている。特に亀裂位置 $Z=500\text{mm}$ に関しては、亀裂の有無及び亀裂向きがはっきりと判断できる結果となった。またこれらの結果より、評価する時間帯の違いによって亀裂向き 0 度方向と 90 度方向でピーク値の差に違いが生じることがわかった。

b) 損傷の深さとその上下方向の位置の探索

亀裂向き 0 度方向が判断できたという条件の下で、次に重錘落下位置を亀裂位置 0 度方向に定め、表-1 に示したような亀裂の位置及び深さが違う杭モデル 7 種類を用いて落錘試験を行い、その時の杭頭の角速度及び加速度のピーク値を調べた。そこで亀裂位置 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、亀裂の位置及び深さを推定した。図-10, 図-11, 図-12 に各亀裂位置における角速度波形、図-13, 図-14, 図-15 に各亀裂位置における加速度波形をそれぞれ示す。これらの図から角速度波形では、先ほど同様に 0.004 秒付近と 0.008 秒付近、また加速度波形では、0.004 秒付近でそれぞれピーク値の差を調べた。その結果を図-16, 図-17, 図-18 に示す。

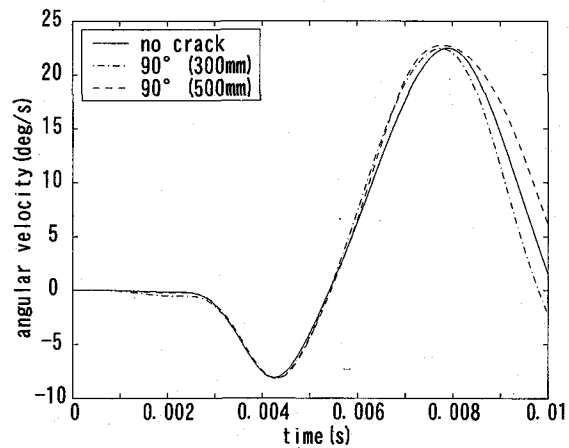


図-7 亀裂向き 90 度方向の杭頭の角速度波形と健全杭の杭頭の角速度波形

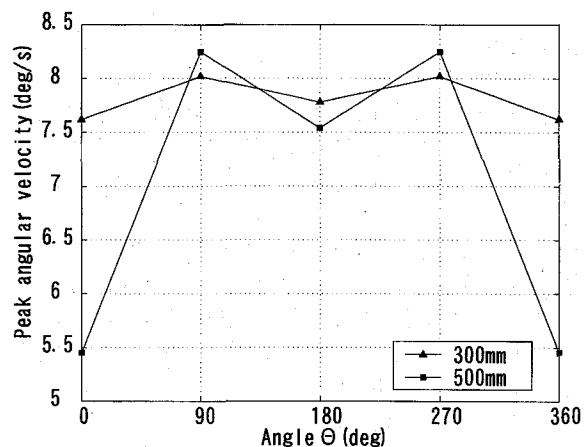


図-8 落錘位置の変化による角速度ピーク値の変化 (0.004秒付近)

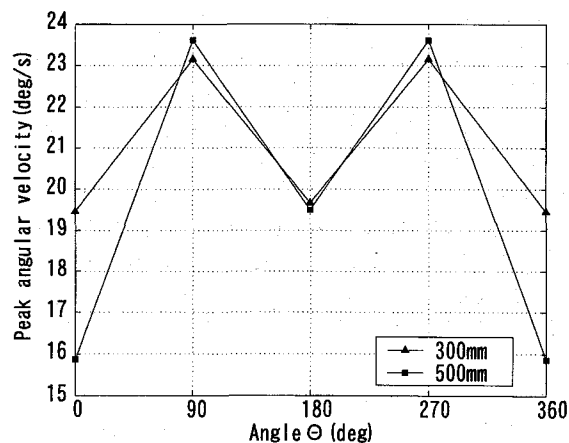


図-9 落錘位置の変化による角速度ピーク値の変化 (0.008秒付近)

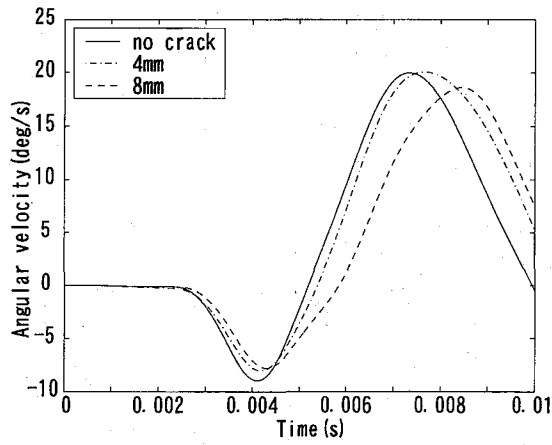


图-10 角速度波形 (龟裂位置 100mm)

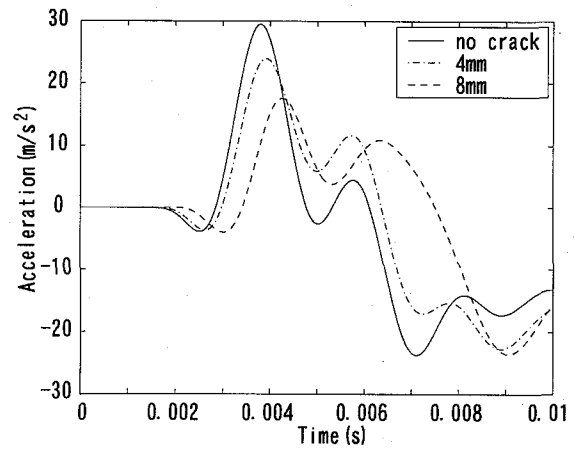


图-13 加速度波形 (龟裂位置 100mm)

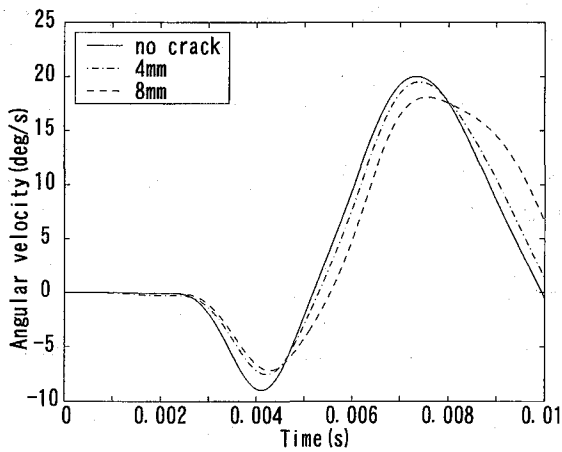


图-11 角速度波形 (龟裂位置 300mm)

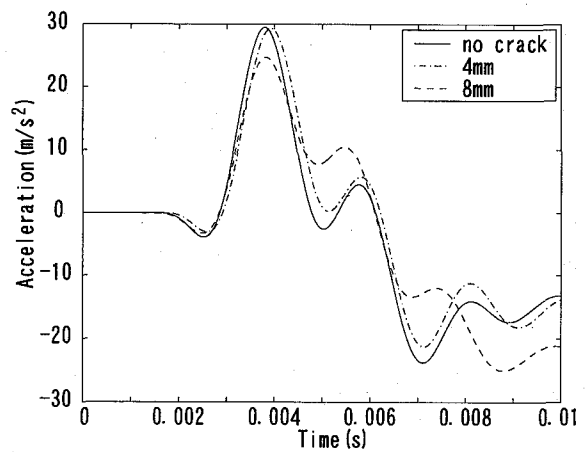


图-14 加速度波形 (龟裂位置 300mm)

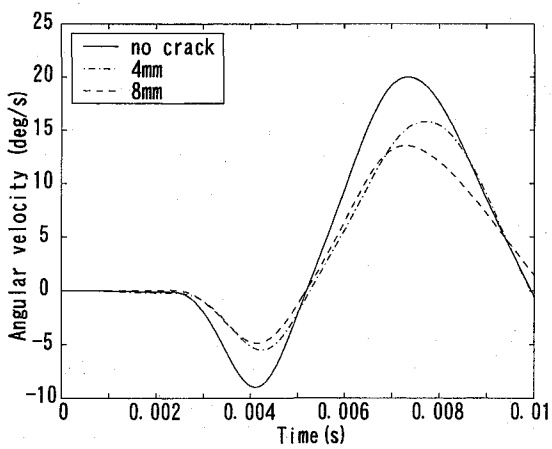


图-12 角速度波形 (龟裂位置 500mm)

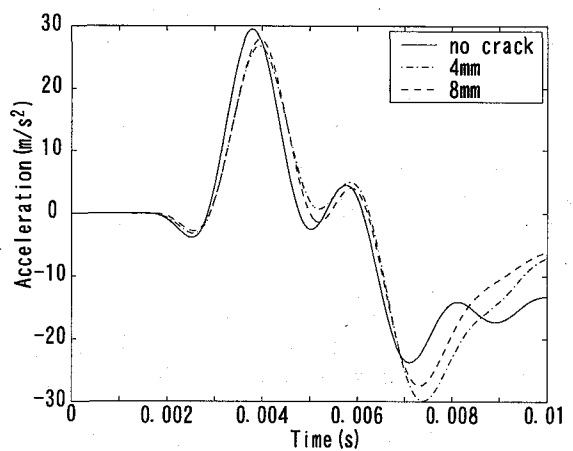


图-15 加速度波形 (龟裂位置 500mm)

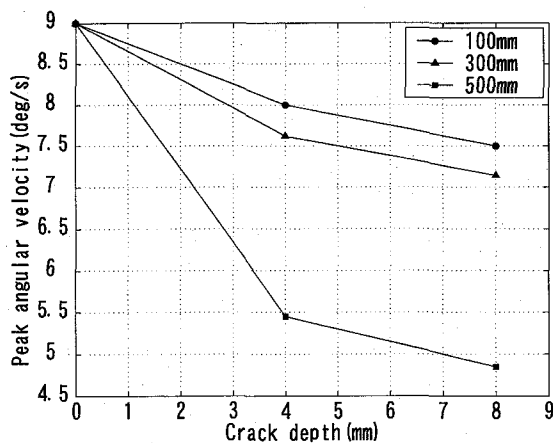


図-16 角速度ピーク値 (0.004秒付近)

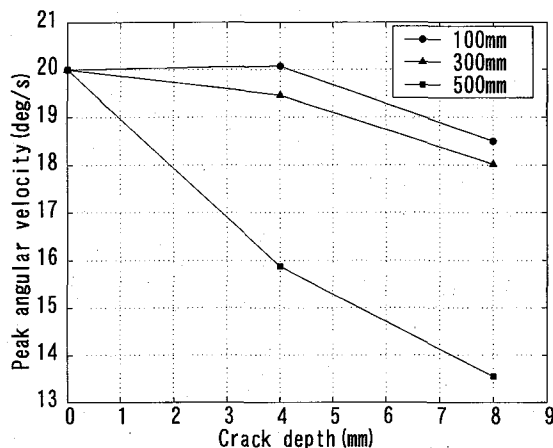


図-17 角速度ピーク値 (0.008 秒付近)

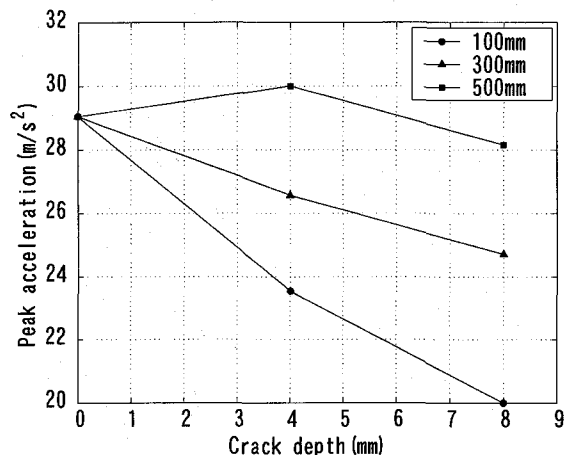


図-18 加速度ピーク値 (0.004秒付近)

図-16 及び図-17 より、角速度ピーク値は、0.004 秒付近及び 0.008 秒付近両方とも、亀裂位置が深くなるにつれて健全杭とのピーク値の差が大きくなっていることがわかる。一方図-18 より加速度ピーク値は、亀裂位置が浅くなるにつれて、健

全杭とのピーク値の差が大きくなっており、角速度のピーク値とは全く逆の傾向が出ていることがわかる。角速度ピーク値の小さくなる傾向は、杭モデルの固有振動数が亀裂位置が深くなるにつれて健全杭に比べて低くなっていることが原因である。

次に加速度ピーク値については、角速度のピーク値が亀裂位置が深くなるにつれて小さくなることから、加速度ピーク値もそれに伴って亀裂位置が深くなるにつれて小さくなるように思われる。しかし、深い位置での亀裂ほど土中での上戴荷重に比例して振動土圧の影響を強く受け、亀裂の深さに伴って亀裂の位置でヒンジ状になり杭に剛体変形が生じると考えられるので、杭頭の変位が角速度よりも加速度ピーク値に大きく影響すると思われる。逆に亀裂位置が浅い位置では、振動土圧の影響が小さいと考えられるので、杭頭の変位は、健全杭に近い値となり、角速度が加速度ピーク値に大きく影響すると思われる。従って亀裂位置が浅いほど加速度ピーク値が小さくなることがわかる。この角速度ピーク値と加速度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。

5. 結言

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・加速度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・加速度を評価し、亀裂の位置・深さを推定した。本研究では、本手法が縮小模型を用いた簡単な実験においてその有効性を確認した。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。

参考文献

- 1) 曾根彰・増田新・小山泰平・山田真・山本鎮男, 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, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp.11-16, 2002.
- 2) 曾根彰・増田新・小山泰平・鷲田公平・山田真・山本鎮男, 既存地中埋設杭の損傷検知システムの研究, 第11回地震工学シンポジウム論文集, pp.1897-1902, 2002