

鋼管杭の水中切断と自動検知装置

Underwater Cutting Method of Steel Pipe Piles and Automatic Detection

栗 田 邦 夫*

Kunio Kurita

市 川 文 彦**

Fumihiko Ichikawa

武 村 忠 志***

Tadashi Takemura

白 石 環****

Tamaki Shiraishi

Synopsis:

Cutting of steel pipe piles underwater is required for some construction works. There are two typical cutting methods, one is an automatic disk-cutting machine and the other is an automatic oxy-arc cutting machine. To ensure the cutting, the authors have developed an automatic detector, to which the electro-magnetic method was applied. This detector, enables workers to know the state of the cutting point. The mechanism of this detector is simple and easy to handle and permits accurate and speedy detection.

1. 緒 言

河川、港湾および海洋に構造物を建設するとき水上から鋼管杭または鋼管矢板を水底地盤深く打ち込み、水底近くで不要となる上の部分を切断、撤去して基礎を形成し、構造物を築造する工法がある。また、他の一例では橋梁基礎として施工されることが多い鋼管矢板井筒工法で、止水を兼ねた仮締切部の鋼管矢板壁を基礎構造の完成後に切断、撤去する。そのいずれにおいても鋼管の水中切断は、工法を構成する主要な要素となっている。その場合、国内では主としてディスクカッタ式または酸素アーク式自動水中切断機が使用されており、切断は水上から遠隔操作により鋼管の中から

行うのが一般的である。しかし、種々の現場的悪条件が重なると切断したはずの鋼管が実際には完全切断できていないことがある。そのような場合には作業工程上極めて不都合となるので有効な切断検知装置が必要とされていた。今般水中切断の検知を目的として、各種水中探傷実験を経てその装置を開発したので、現有する水中切断機の概要と併せて報告する。

2. 自動水中切断機の概要

水中構造物の主要部材は鋼管が広範囲に用いられている、その理由は断面性能が優れ、断面に方向性がなく、まして流水抵抗が少ないなどがあり構造物の規模によっては特殊鋼、大径厚肉鋼管が

* 技術研究所第4研究部計測研究室室長（部長補）
 *** エンジニアリング事業部製鉄エンジニアリング技術部プラント技術室主任（課長）
 [昭和57年6月29日原稿受付]

** 技術研究所第4研究部計測研究室主任研究員（掛長）
 **** エンジニアリング事業部土木技術部建材技術室主任（掛長）

大幅に使用されている。

水中切断法としては従来から潜水夫がサルベージで使用しているものとして、酸水素ガス、テルミット、酸素アークの各溶断法および発破切断法などがあげられる¹⁾が、鋼管を水底土中で切断しなければならないこと、また、高水深で能率よい作業を考えれば必然的に鋼管の内側から自動切断する方法が開発されることは当然である。最近では酸素アーク自動水中切断機を使って150mの高水深を想定した切断実験²⁾が成功している。

当社が保有する水中切断機は、一般的な用途としてディスクカッタ式、海洋構造物など大型工事用として酸素アーク式、また、特殊用途として砥石式（本報告には削除）、の3機種で、工種および条件によってそれぞれの特徴を発揮している。

2.1 ディスクカッタ式自動水中切断機

切断原理は被切断体が鋼管の場合、Photo. 1に示す特殊合金製の円盤型カッタを管面に強く押付けた状態で、装置部分を旋回させて切断する方法である。従来、製鉄所などで造管設備の一環で使用されているが、この種の切断機は鋼管の外側に複数のカッタを配置したものがほとんどである、これでは鋼管の外表面に継手管がある鋼管矢板や水底土中の鋼管杭は切断できない。したがって鋼管の中に切断機を固定し、内面から切断できるように考案されたものである。

機構はPhoto. 2にあるように機械本体に収納されている油圧シリンダを上下それぞれ4方向に張出して鋼管内で自らを固定したのち、本体下部にあるカッタを張出してその部分の装置を旋回させ



Photo. 1 Disk-cutter

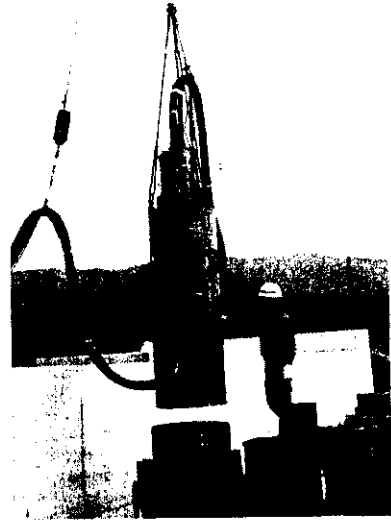


Photo. 2 Disk-cutting machine

て切断する。一般的な鋼管矢板のサイズを切断する場合、カッタは1枚または、2枚ないし4枚を組み込んだ機種もあるが、いずれも高速旋回（30～50rpm）であるため切断時間は90sから180sの範囲である。

この切断機は油圧を利用した機械式であるため最も信頼性があり、切断実績は最も多いが高水深の場合、遠隔距離によっては圧力低下など物理的に切断が不利となり、また、破断切断法であるため高張力鋼や厚肉鋼管では困難を伴うことがある。

2.2 酸素アーク式自動水中切断機

この方式は通産省工業技術院四国工業技術試験所の基礎技術を基に同所と清水建設(株)および川鉄の3者共同研究で実用化したものである。

切断原理はPhoto. 3に示す軟鋼製の中空溶断棒（外径10mm前後、外面フラックス付）を使用し溶断棒と被切断体（以下母材という）との間にアークを発生させて母材の一部を溶かすと同時に中空部を通して酸素を吹きつけ、母材の酸化反応熱を利用して溶断する。したがって切断できるものは軟鋼に限らず、特殊鋼やアルミニウムなどアークが発生できる全ての金属に適用でき、Table 1に示すように薄板から110mm前後の厚板まで広範囲な溶断が可能である³⁾。

切断機はPhoto. 4に示すもので、鋼管内の所定の位置で機械本体内に収納されている油圧シリン

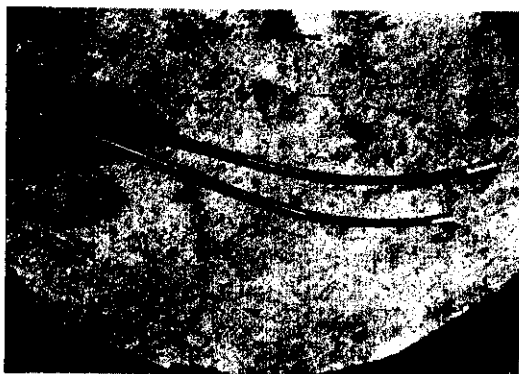


Photo. 3 Cutting electrode rod

Table 1 Optimum condition for oxy-arc cutting

Thickness (mm)	Amp. (A)	Arc volt (V)	Oxy pressure (kgf/cm ²)	Cutting speed (cm/min)	Cut length* (m)
110	300	47~50	5	17	40
70	300	47~50	5	35	80
40	300	47~50	4	60	150
20	300	47~50	3	95	250
12	300	47~50	2	95	250

* : At 1m length of cutting electrode rod

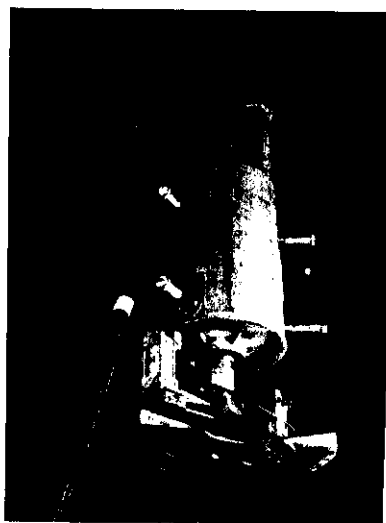


Photo. 4 Oxy-arc cutting machine

タを水平3方向に突出して自らを固定し、Fig. 1に示すように2本の溶断棒をそれぞれ展開して鋼管内面に軽く接触させてから通電して溶断を始め、同時に下端部を旋回させる。この場合下端部は鋼管内周を半旋回して切断を完了できる。溶断棒は

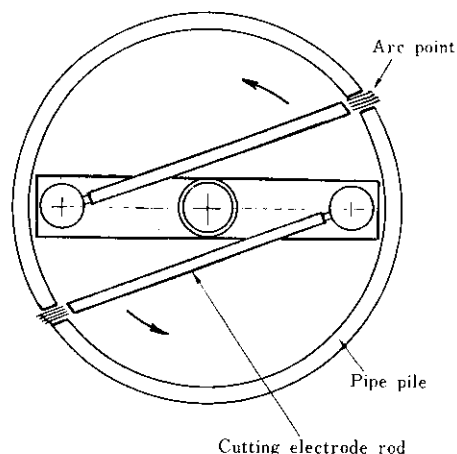


Fig. 1 Cutting method of pipe by cutting electrode

母材の溶断とともに消耗することとなり、またフラックスを塗布しているため自動送給できない。したがって鋼管径、板厚、切断水深などを考慮して溶断棒径、所要長さおよび最適なコントロール条件を設定することとなる。その条件は電流、電圧、酸素圧はもちろん旋回速度および棒と母材の接触角度も重要な要素となる。

3. 鋼管の水中切断と問題点

土木、建築の基礎として打込まれる鋼管杭および鋼管矢板には基礎構造にもよるが、それぞれに違った内部応力が残留し、また、断面変形も生じている。例えば鋼管矢板井筒基礎のように強大な打撃力で地中深く鋼管矢板を貫入して井筒を形成してから継手管どうしに止水を施し、締切壁にしたあと井筒内部を排水し、掘削してコンクリートで鋼管矢板と剛結して築造する基礎の場合、土圧、水圧など外力によって鋼管には内部応力が残留し、その強弱、分布、方向がまちまちでそれが極端な場合ディスクカッター切断を不完全にすることもある。

また、鋼管の剛性を増す方法として鋼管の内部土砂を下方のあるレベルまで掘削し、代わりにコンクリートを充填する。その場合、鋼管内面には土砂、泥あるいはコンクリート投入によるセメント類の付着がアークを遮断し、酸素アーク切断を不完全なものにすることがある。

前者の場合、切断設定条件や切断方法で対処し

後者ではあらかじめ掃除機の使用である程度解決できるが鋼管1本1本の性状を知って運転することは事実上不可能であるためオペレータは包括的な一定条件を設定してコントロールするのみで、有効な切断検知機能がないため勘に頼る要素も存在する。

工事工程上どうしても鋼管の切断作業は一貫して全数を実施した後、引抜きとなる。引抜きはクレーン単独またはパイプロハンマが使用されるが、大きな切残しが存在する鋼管は引抜き不能で、再切断することとなり極めて不合理な結果となる。いわゆる引抜いてみるまで切断を確信できない、そのことは経済的に大きな損失となりそれが大規模な工事であればある程、許されない。そこで切断完了か未了か、またどれだけ切残しが存在するかをコントロールユニットで物理的に図化、再現して知ることがどうしても必要となる。

4. 切断検知方法の開発

4.1 検知方法の検討

鋼管杭などの水中切断の状況を知るための検知器の開発にあたって、①水底土中いわゆる泥水中での作動であること。②現有する水中切断機に装置できること。③30m以上離れたコントロールユニットで読取りができるシステムであること、などの条件のほか④切断部の残存状況を精度よく、確実に検知するとともにその残存する厚さも測定する必要がある、など困難な問題がある。

国内で稼動する水中切断機にはこのような条件を満足した検知器または装置が実用に供されている例はなく、わずかに電磁誘導法を利用した理論⁴⁾が知られるのみである。ここでは超音波、振動など非破壊検査技術を検討した結果、上述の諸問題と自動化、操作性を考慮して電磁誘導法を利用した渦電流方式に実現の可能性を見出した。そこでこの方式を利用する際に生じる問題点を明らかにし、その解決策を研究し、渦電流方式の長所を生かした検知器の実用化を計ることとした。

4.2 渦電流式検知方法の原理と問題点

渦電流式検知方法の原理を Fig. 2 に示す。交流

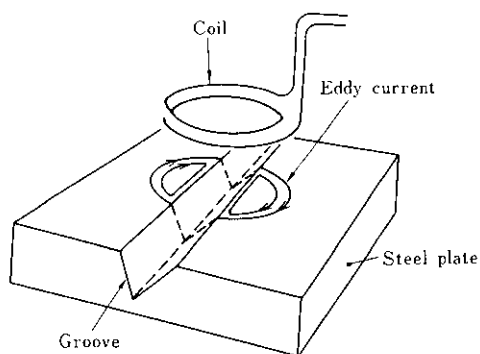
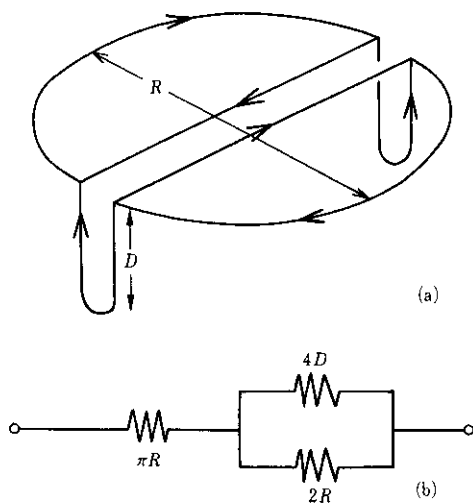


Fig. 2 Principle schema of eddy current testing method to detect the groove depth on steel plate cutting

電流を通した電磁コイルを鋼板に近接させると鋼板に渦電流が生じる、この渦電流は切断部の状況（主に切断途中の溝の深さ）によって図のように電流の経路が乱され、このため渦電流の作る磁場が変化しコイルのインピーダンスが変化する。したがってコイルを切断線に沿って走査させながらコイルのインピーダンスの変化を監視すれば切断状況が推定できる。今、交流電流の周波数が高く、渦電流が鋼板の極く表面を流れるとし、切断部の溝のため渦電流の経路が Fig. 3(a) のようになると仮定すれば電気的等価回路は Fig. 3(b) になり鋼



D : Groove depth, R : Coil diameter

Fig. 3 Path of eddy current flow (a), and its equivalent electric circuit (b)

板の電気抵抗率のみかけの増加は(1)式となる。

$$\Delta\rho = \frac{4D}{\pi(R+2D)}\rho_0 \quad \cdots\cdots(1)$$

ρ_0 : 溝がない鋼板の電気抵抗率

$\Delta\rho$: 溝のための鋼板の電気抵抗率の増加

D : 溝の深さ

R : コイル径

一方、鋼板の電気抵抗率とコイルのインピーダンスの関係は理論計算できる^{5,6)}。計算によると鋼板の電気抵抗率の増加とコイルインピーダンスの増加との関係は近似値に(2)式で表現できる。

$$\Delta Z = K \log\left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho_0}\right) \quad \cdots\cdots(2)$$

ΔZ : コイルのインピーダンスの変化の絶対値

K : 比例定数

(1)式と(2)式から溝深さとインピーダンスの変化との関係を計算し、グラフに示せばFig. 4を得る。すなわちインピーダンスの変化は溝深さに対し単調に増加し完全切断部では不連続に増大することが期待される。しかし原理から明らかなように、コイルのインピーダンスは鋼板とコイルの距離変動(リフトオフ変動)および鋼板の材質的、磁気の変動に大きく影響される。これらは本測定に対し雑音であり、測定精度を妨げる要因となり解決すべき問題である。

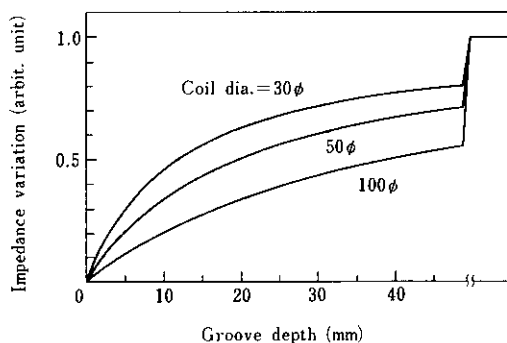


Fig. 4 Relation between coil impedance variation and groove depth (calculated value)

4.3 測定装置および実験方法

実験に使用した検出装置のブロック図をFig. 5に示す。通常の非破壊検査に使われる渦流探傷器

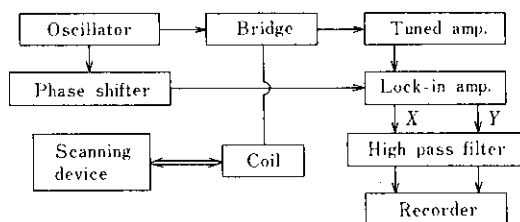


Fig. 5 Block diagram of detecting system

と本質的に同等である。すなわち発振器は検知コイルが一辺になっているブリッジに一定周波の交流電圧を供給する。ブリッジは検知コイルが鋼板の切断部溝の外にあるとき平衡がとられ溝部に来たとき不平衡交流電圧を発生する。この信号はロックインアンプによって同期位相検波され、コイルのインピーダンスの変化分の x 、 y 成分に比例する直流信号に変換され、レコーダなどに記録される。走査部は検知コイルを溝部に沿ってFig. 6(a)のように平行走査またはFig. 6(b)のように揺動走査させるものである。

実験方法は試験片として板厚12.5mm, 25mm, 35mm, 50mmの4種類の鋼板(SS41相当品)のそれぞれの中心部を切削加工し、Fig. 7に示すよう

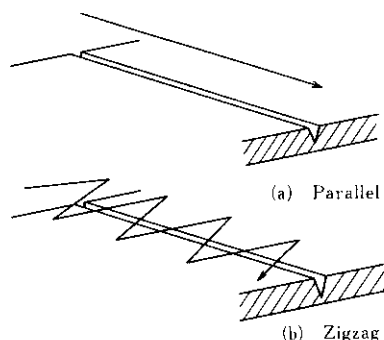


Fig. 6 Two motions of probe scanning

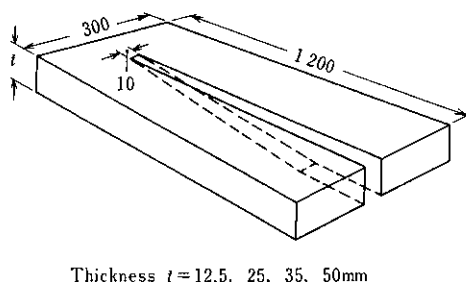


Fig. 7 Shape and dimension of four test pieces

に切削深さが徐々に増し、最終は裏面に達する溝を持った鋼板試験片を製作し、この試験片に対しコイルによる平行走査および揺動走査を行い、渦電流式検知方法の溝深さ検出特性を調査した。

4.4 実験結果

4.4.1 検知信号の位相解析

インピーダンスはベクトル量であるので切断の溝信号およびリフトオフ変動信号が実際にどのようなベクトル変化になるか調査した。Fig. 8に正常部から溝部にコイルを移動したとき、および正常部でリフトオフを変えたときの信号の変化を示した。切断溝信号とリフトオフ変動の信号はそれぞれ異った位相方向に変化し、その角度差は90度に近い。この結果からリフトオフ変動の信号と90度異なった位相で検波を行えばリフトオフ変動の影響が小さい溝信号が得られることがわかる。しかし当然ながらリフトオフが大きくなれば溝による信号の変化も小さくなるので実際の検知器では、できるだけリフトオフの変動が起らない装置にする必要がある。

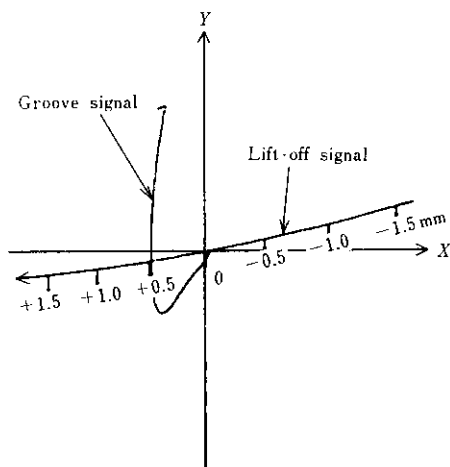


Fig. 8 X-Y display of lift-off signal and groove signal

4.4.2 試験周波数と検出特性

コイルに励磁する最適周波数を決定するため、周波数を2, 10, 50kHzに変えて検出特性を調べ

た。Fig. 9にその結果を示すが、3者にほとんど差が生じない。鋼板に流れる渦電流の深さ方向分布を示す浸透深さ δ は次式(3)で表される。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \quad \text{.....(3)}$$

ω : コイルの励磁角周波数

μ : 鋼板透磁率

ρ : 鋼板電気抵抗率

Fig. 10にこの計算結果を示すが、2kHzでも $\delta=0.5\text{mm}$ であり今回問題にしている切断溝深さ5~50mmに対して十分に小さいため周波数変化の効果が現れなかったと考えられる。周波数によって検出特性に差が出てくるのは、図からみて10Hz以下

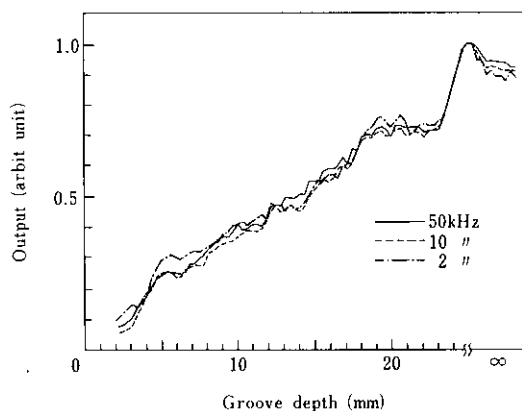
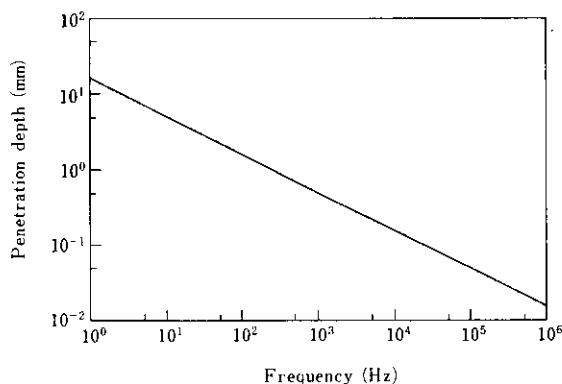


Fig. 9 Influence of test frequency on output characteristic



$\rho = 10^{-7} \Omega\text{m}$, $\mu_r = \mu/\mu_0 = 100$ for steel,

μ_0 : Space permeability

Fig. 10 Eddy current penetration depth (calculated value)

下と考えられ、これは測定の周波数応答を考えれば実用的でないといえる。したがって実用的周波数（1～100kHz）では適否の差は生じないので実用器にはコイル、電気回路の作りやすい20kHz前後が適当と考えられる。

4・4・3 コイル径と検出特性

コイル径と検出特性の関係を調べるため30, 50, 100mm ϕ の3種類のコイルを用いて、それぞれの検出特性を調べる実験を行った。結果をFig.11に示す。コイル径を大きくすると溝深さに対する感度は悪くなるが、貫通溝部分での不連続的信号増加の割合は大きくなり、貫通部分の検知には有利になる。しかし貫通していない途中の情報コイル径の範囲に広がったものとなるので切断溝に沿った長手方向の位置分解能は悪くなる。

これらの実験結果は原理のところで述べた理論的考察と定性的ではあるが一致している。コイル径はこのように検出すべき切断溝の深さと位置分解能によって決められる。実用器においては35mmまでの鋼管板厚を想定しているので50mm ϕ のコイ

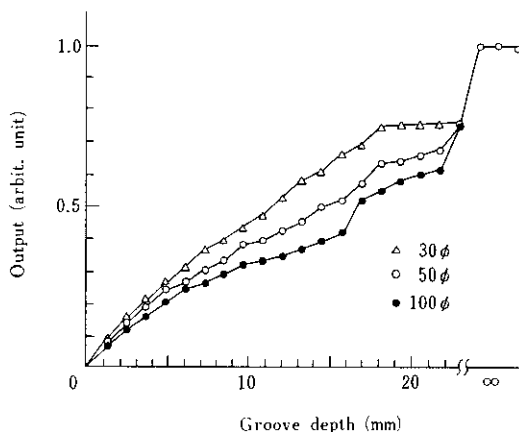


Fig. 11 Influence of coil diameter on output characteristic

ルを使用するのが適当と判断される。しかし35mmより厚い鋼板に対してはコイル径をさらに大きくする必要がある。

4・4・4 平行走査法と揺動走査法の比較

平行走査法（Fig. 6(a)）によって25mm厚の試験片を測定した結果をFig. 12(a)に示す。この走

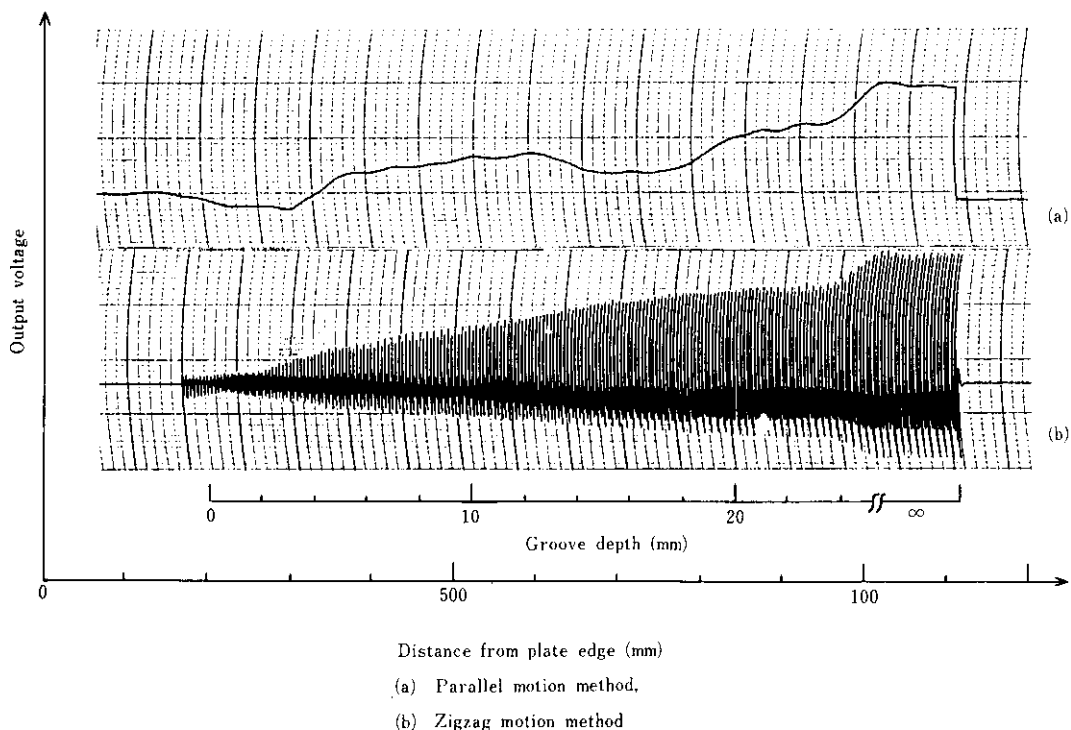


Fig. 12 Comparison of two methods of motion

査方式の場合、図からわかるように鋼板の表面の錆の有無（特にマグネタイト）など材料の電磁的性質の変化の影響を強く受け、溝深さと検知信号との間に良い相関が得られていない、図では溝の貫通部分で信号の段差があり、その部分が検出できているが、もし貫通部分にも電磁的变化があればその部分を明瞭に検出できない場合が予想される。

次に揺動走査法（Fig. 6 (b)）によって同じ試験片を測定した結果を Fig. 12 (b) に示す。これはコイルを揺動することによってコイルが鋼板部分と溝部分を交互に通過するようにし、コイルが溝を通過する際の急激なインピーダンスの変化分のみを周波数弁別して取り出すものである。鋼板の電磁的性質の変化の信号は周波数成分が小さいので周波数弁別は適当な遮断周波数（この場合 2 Hz）を持ったハイパスフィルタで行えばよい。Fig. 12 (b) から、本方法により鋼板の材質の磁気的変化の影響を受けないで、しかも切断溝の深さの検知が可能で、また、貫通部分を明瞭に検知できることがわかる。

4・4・5 最適条件での検出特性

前述する実験結果から渦電流法による最適検知条件を Table 2 に示す。この条件で 12.5mm, 25mm, 35mm, 50mm の鋼板試験片で測定した結果として切断溝深さと検出出力との関係を Fig. 13 に示す。板厚が異った試験片に対してもほぼ同じ検出特性を示すとともに、各試験片それぞれも貫通部分は明瞭に検知することができることを示しており、

Table 2 Optimum condition for detection

1	Scanning	Zigzag motion
2	Stroke width	125mm
3	Stroke rate	1 stroke/s
4	Test frequency	20kHz
5	Coil diameter	50mmφ
6	Lift-off	Max. 25mm
7	Detection phase	Perpendicular to lift-off signal
8	Cut-off frequency of high pass filter	2 Hz

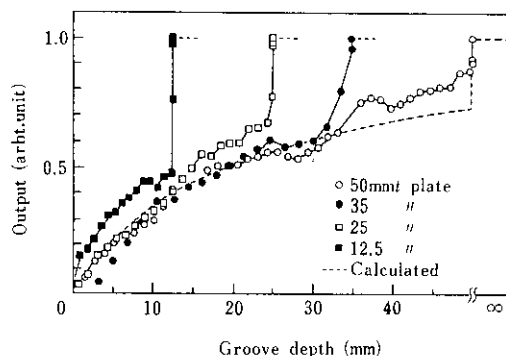


Fig. 13 Relation between output and groove depth measured under the optimum detecting condition shown in Table 1

本方法によって鋼管杭などの切断状況を安定して検知できることが明らかになった。

5. 水中での自動検知器

5・1 試作装置

現有するディスクカッタ式水中切断機にとりあえず本装置を取り付けると仮定して試作器を製作した。センサ部の構造を Fig. 14 に示す。センサは揺動装置とともに防水型収納ケースに収められている。揺動装置はモータ、ボールリバーサ、センサガイ

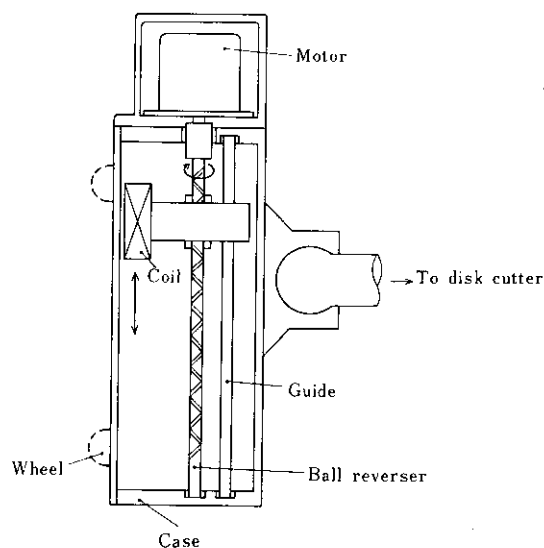


Fig. 14 Configuration of detecting head

ドで構成され、センサは125mmの範囲で上下往復運動させる。ボールリバーサを使用することによって装置はコンパクト化が達成できた。

収納ケースはセンサの上下動の中心点をレベルにしてディスクカッタと同一高さ位置に取り付けられスプリングなどにより鋼管内面に軽く押付けるとともに同ケースに具備してあるボールキャストで鋼管表面とセンサの距離いわゆるリフトオフを一定に保つほか、切断溝に沿って走行可能になっている。センサからの信号ケーブル、モータの電源ケーブルはスリップリングによって切断機の施回部の外に取り出され、30mの防水ケーブルにより測定器に接続される。測定器はTable 2に示した最適検知条件を満足する仕様になっている。

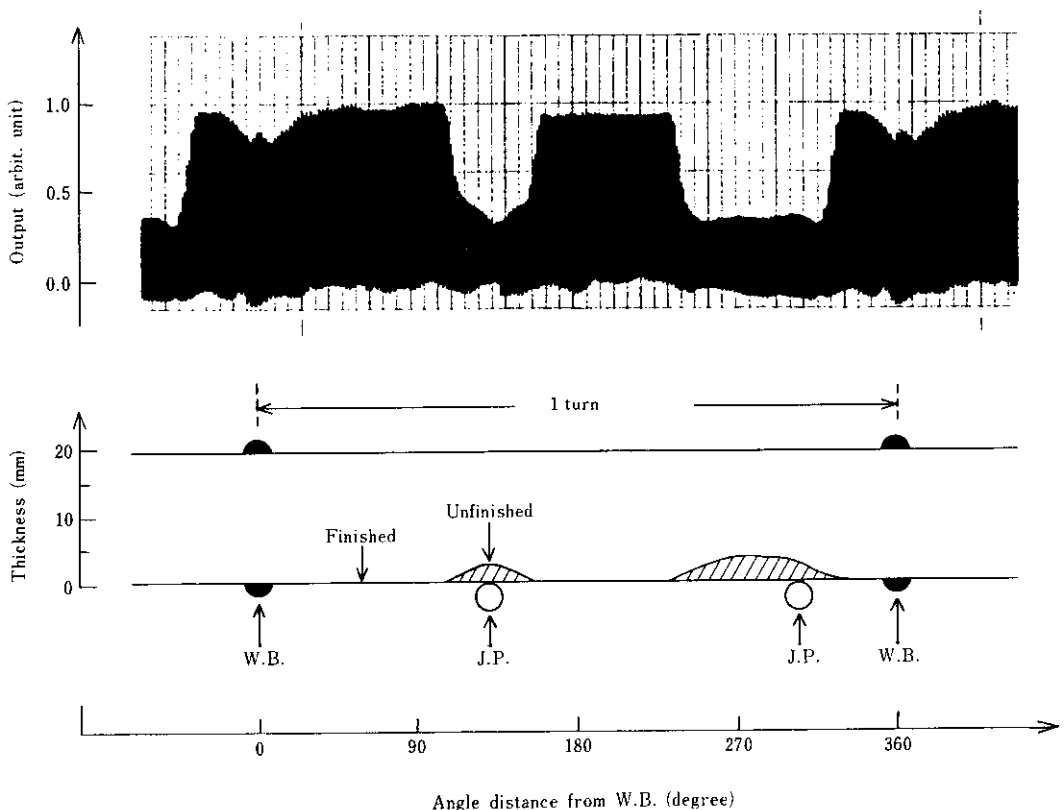
5.2 確性実験

試作器をディスクカッタ式水中切断機に取り付け、以前同機で切断を行った鋼管を使い、切断状況

の検知を実際に合わせて水中で行った。実物はスパイラル鋼管でサイズは1016 ϕ ×19tである。その結果をFig. 15に示す。同図に鋼管の切断部分の状況を展開して測定と対比できるように示した。この鋼管の切断はほぼ完全なもので外面に取り付けられている継手管の部分にわずか2～3mm厚の切り残し部分が2箇所あるが、クレーンで引き抜き可能なものである。

検知信号は溶接ビード部でわずかに乱れを生じているがそれ以外では切断溝深さに対応して信号が大きくなり、また貫通部分も段差をもって検知できており、切断状況を良くとらえている。

以上により本装置は試作器であるが実用上の目的を達することができ、また理論上の確性を得ることができた。今後実用器を製作し現場での使用を確立する予定である。また酸素アーク切断を想定した検知実験も行った。その結果は、ここに述べる報告に包括されるものである。



Pipe size : 1016 ϕ ×19t, W.B. : Welding bead position, J.P. : Junction pipe position

Fig. 15 Detection of unfinished cut area in steel pipe pile examined

6. 結 言

建設の施工技術は規模の大小を問わず、最近特に機械化が著しく、また、自動化、半自動化が進んでおり、その発想は省力化とともに施工の確実性と安全性の追求を目的としている。水中切断もその一端で、水中溶接とともに関心が高く、建設分野では広範囲な用途にその研究開発が続けられている。

水中探傷法については工場での固定設備を除いては未だ研究の域にあり、ましてその自動化に至っては前例がなく、この方法、装置が目的に合わせて有効に活用でき、また、他に応用できることになれば検査、探傷技術の向上にとって有益なことである。

なお、本開発は株式会社技研工業との共同研究に基づくものであり、また、当社エンジニアリング事業部構造技術研究所ならびに川鉄計量器株式会社の協力を得て完了した。

参 考 文 献

- 1) 白石他：「鋼管の水中自動切断装置の開発」橋梁, 14 (1978) 1, 57
- 2) 浜崎他：「高水深150mにおける厚肉鋼管の自動水中酸素アーク切断について」溶接学会誌, 50 (1981) 10, 26
- 3) 浜崎他：「鋼管の水中自動酸素アーク切断」溶接技術, 27 (1979) 3, 57
- 4) 大林組他：特公昭 53-2138
- 5) 尾上：電気学会誌, 88-10 (1968) 961, 162
- 6) C.V.Dodd *et al.* : J. Applied physics, 39 (1968) 6, 2829