
プラズマアークを用いた鋼管矢板水中切断工法・装置（プラズマカッター）の開発
Development of Underwater Cutting Method of Interlocked Steel Pipe Piles Using Plasma Arc

藤田 勉 (Tsutomu Fujita) 井村 英俊 (Hidetoshi Imura) 赤秀 公造 (Kohzo Akahide) 小関 楯志 (Tateshi Koseki) 橋本 正治 (Masaharu Hashimoto)

要旨：

仮締切兼用鋼管矢板井筒工法においては、従来は継手をあらかじめ切断しておくプレカット工法が一般に用いられている。この工法では打込鋼管の高止まり時の対応が必要となることや、漏水の危険性が高いなどの問題点があるため継手を含めた鋼管矢板の切断法が検討されていたが、切断法に問題があり、十分なものではなかった。そこで、継手と本管を同一装置で切断する「プラズマアークを用いた水中切断工針装置（プラズマカッター）」を開発した。プラズマアークと砥石カッタを用いることにより、鋼管矢板の本管と継手を確実かつ高品質高能率に切断することができる。800mmφの鋼管矢板の実切断所要時間は約20分/本であり、省力化施工が可能となる水中自動切断工法を確立した。

Synopsis：

Interlocked steel pipe piles are driven into the ground for construction of piers located in rivers or the sea. In such cases underwater cutting is often required at the end of construction. Cutting of junction pipes is so hard that the pipes will usually be cut before driving. This construction method sometimes causes troubles of water leakage and so on during construction. An effective underwater cutting machine system has been developed to solve these problems. It can cut not only pipe piles but also junction pipes. The system is mainly composed of a plasma arc cutting device and a grindstone device. The mechanism is simple and remote-controlled using some sensors attached. Work time needed for cutting a 800-mmφ steel pipe pile and a couple of junction pipes is about 20 minutes, and thus an efficient automatic underwater cutting method has been established.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

プラズマアークを用いた鋼管矢板水中切断工法・ 装置（プラズマカッター）の開発*

川崎製鉄技報
20 (1988) 4, 279-284

Development of Underwater Cutting Method of Interlocked Steel Pipe Piles Using Plasma Arc



藤田 勉
Tsutomu Fujita

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 主任研究
員(課長)



井村 英俊
Hidetoshi Imura

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 主任研究
員(出長)



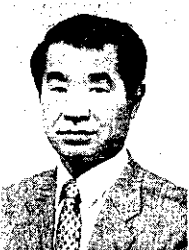
赤秀 公浩
Kohzo Akahide

エンジニアリング事業
部 研究開発センター
施工研究室 室長(部
長)・工博



小関 楯志
Tateshi Koseki

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(課長)



橋本 正治
Masaharu Hashimoto

エンジニアリング事業
部 建材技術部 主査
(課長)

要旨

仮締切兼用鋼管矢板井筒工法においては、従来は継手をあらかじめ切断しておくプレカット工法が一般に用いられている。この工法では打込鋼管の高止まり時の対応が必要となることや、漏水の危険性が高いなどの問題点があるため継手を含めた鋼管矢板の切断法が検討されていたが、切断法に問題があり、十分なものではなかった。そこで、継手と本管を同一装置で切断する「プラズマアークを用いた水中切断工法・装置(プラズマカッター)」を開発した。プラズマアークと砥石カッターを用いることにより、鋼管矢板の本管と継手を確実かつ高品質高効率に切断することができる。800 mmφの鋼管矢板の実切断所要時間は約20分/本であり、省力化施工が可能となる水中自動切断工法を確立した。

Synopsis:

Interlocked steel pipe piles are driven into the ground for construction of piers located in rivers or the sea. In such cases underwater cutting is often required at the end of construction. Cutting of junction pipes is so hard that the pipes will usually be cut before driving. This construction method sometimes causes troubles of water leakage and so on during construction. An effective underwater cutting machine system has been developed to solve these problems. It can cut not only pipe piles but also junction pipes. The system is mainly composed of a plasma arc cutting device and a grindstone device. The mechanism is simple and remote-controlled using some sensors attached.

Work time needed for cutting a 800-mmφ steel pipe pile and a couple of junction pipes is about 20 minutes, and thus an efficient automatic underwater cutting method has been established.

1 緒 言

近年、わが国においては道路、鉄道の立地難から海岸近くの河川や港湾内での橋梁建設が目立っている。この場合には、橋長が大きくなることが多く、水中に基礎を設ける必要がある。基礎工法としては、悪い地盤での施工性にすぐれている仮締切兼用鋼管矢板井筒が多用されている。この工法では、仮締切として使用した鋼管矢板壁の水底近くで、不要となる上の部分を水中または土砂中で切断し撤去する必要がある。

従来、鋼管矢板の本管について砥石カッター¹⁾、ディスクカッター²⁾の他に自動酸素アーク³⁾などによる切断工法が開発実用化されてきた。一方、本管を連結する継手としてはモルタルを充填した鋼管が一般的に用いられているため、水中かつ遠隔操作で切断することは容易ではない。このため鋼管矢板の打込み前にあらかじめ継手の一

部をガスカットし、その空所に止水材を充填するプレカット工法が採用されていた。その一例を Fig. 1 に示す。この工法では鋼管矢板の打設時の高止まりや、漏水トラブル等の不都合が生じる場合がある。そこで能率的に継手を切断することが可能となれば、あらかじめ継手をガスカットする必要のないノンプレカット工法を採用することができ、上述の問題点を解決することができる。これまでも本管と継手の切断法が検討されていたが、切断上の問題があり十分なものではなかった。

今回、ノンプレカット工法の確立を目指し鋼管矢板の本管と継手部を水中で同時に切断する方法について種々実験をくり返した結果、継手を砥石カッターで切断し、本管をプラズマアークにより切断する技術確立することができた。本報告ではこの鋼管矢板水中切断工法および装置(プラズマカッター)の概要について述べる。

* 昭和63年7月28日原稿受付

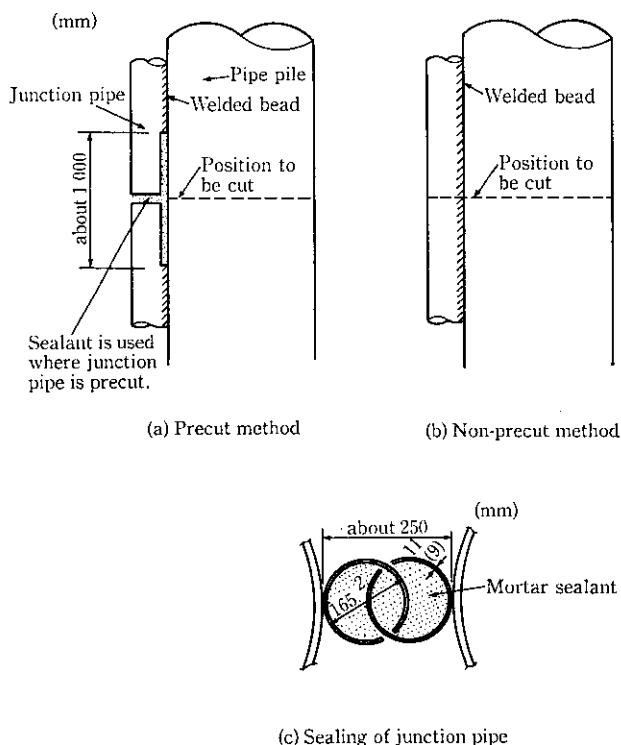


Fig. 1 Precut and non-precut configurations of junction pipes

2 ノンプレカット方式の鋼管矢板に適用する水中切断法の基本条件

仮締切兼用鋼管矢板井筒工法に関し実用化されているか、実用化の可能性のある切断方法を Table 1 にまとめて示す。各々の方法には一長一短があるが、本管切断用として金属製の刃を用いた切断法が切断速度が大きく、操作容易という点から多用されてきた。他方、継手管のモルタルには、金属製の刃による切削は能率的ではなく、また導電性がないため電気エネルギーのみによる切断も原理的に困難となる。

鋼とモルタルの複合材料である継手の切断に対してはこれまでの種々の実験および経験から、砥石カッタ法が最適と考えられる。しかし、本切断法においては一般的に砥石板の破損や、被切断物へのかみ込みが生じやすい欠点があるため、本管や継手の変形や変位が生じない間に継手を切断することが必須と考えられる。切断順序を

Table 1 Underwater cutting methods

Kind of energy	Method	Cutting way
Mechanical energy	Grinding	Grinding by grindstone
	Cutting	Cutting by metal blade
	Jetting	Abrasive water jet
Electrical energy	Plasma	Plasma arc Plasma jet
	Electric discharge	Oxygen-arc Smelting electrode with water jet Arc-saw
Optical energy	Laser	
Chemical energy	Blast	Blast cutting (Neumann effect)

本管→継手とすれば、継手の切断末期に本管の拘束が弱くなることから本管の変形や変位が生じるためこの条件を満たすことができない。切断順序を継手→本管とすればこの条件を満たすことができる。一方、この切断順序では本管の切断終了時にはすでにそれ以前に継手が切断されているため本管の変形、変位が集中する。したがって本管の切断手段としては管の変形、変位などにより影響を受けない非接触切断方式が好ましい。非接触切断方法にはプラズマアーク法、ウォータージェット法、酸素アーク法などがあるが、鋼管矢板が河川や海中に設けられることが多いなどの環境条件を考慮して総合評価した場合、本管の切断に対してはプラズマアーク法が最適であると考えられる。

上記背景を考慮してノンプレカット工法に適用する水中切断工法・装置の設計基本コンセプトを次のとおりとした。

- (1) 最終切断を非接触で行う。
- (2) 切断順序を継手→本管とする。
- (3) 継手切断を砥石カッタ方式、本管切断をプラズマアーク方式とする。
- (4) 同一装置で本管と継手を切断する。
- (5) 本管と継手の切断レベルを一致させる。
- (6) 切断作業は地上にて遠隔で操作する。

3 切断方式の基本的検討

本管と継手を同一の装置で切断する方式の確立を目標として、砥石カッタを用いた継手切断とプラズマアークを用いた本管切断の実験を行った。

3.1 砥石カッタを用いた切断実験

3.1.1 実験方法

水槽内において砥石カッタによる切断実験を行った。供試体の継手は外径 165.2 mm、厚さが 9 mm の鋼管であり、鋼管内には圧縮強度 240 kgf/cm² のモルタルを充填した。供試体の本管は外径 800 mm、厚さが 16 mm の鋼管の一部を切り出したものであり、継手は溶接で取り付けられている。

砥石カッタ切断時の回転所要動力および切削力は動力の測定値から求められる。

3.1.2 砥石カッタ回転数と回転抵抗

水中で砥石カッタを回転するときの摩擦損失動力 L_f (kW) は理論的に次式で示される。

$$L_f = k\rho U^3 D^2$$

ここに、 ρ : 流体の密度 (kg/m³)

U : 円板の周速 (m/s)

D : 円板の直径 (m)

k : 円板の摩擦係数

実験結果は Fig. 2 に示され、 $k=2.9 \times 10^{-6}$ となる。水中における砥石カッタの摩擦損失動力は回転数が増すにつれ、指数関数的に増大することがわかる。気中においては砥石カッタの適正周速として一般的に 2 000–3 500 m/min が選ばれているが、水中においては損失動力が大きくなるため 1 600 m/min 程度以下の中低速切断を選択した方がよいという結論が得られた。

3.1.3 砥石カッタの切削力と切断所要時間

砥石カッタの周速が 1 000 m/min のとき、砥石カッタに作用している単位厚さ当たりの切削力 $A=F_t/l$ と、継手を切断するときの所要時間との関係を Fig. 3 に示す。砥石カッタの切削力が大きくなると、継手の切断所要時間は低減するが、砥石カッタの摩耗量が大き

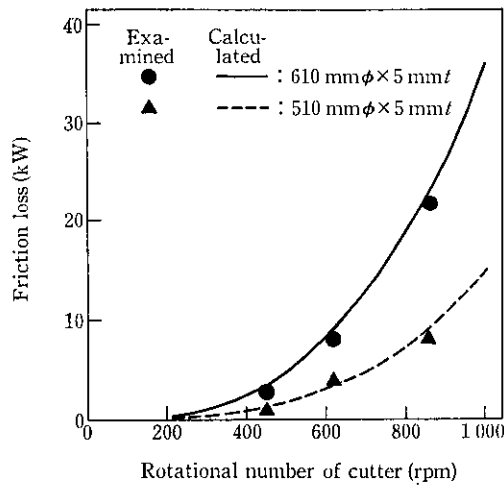


Fig. 2 Relation between rotational number of cutter and friction loss

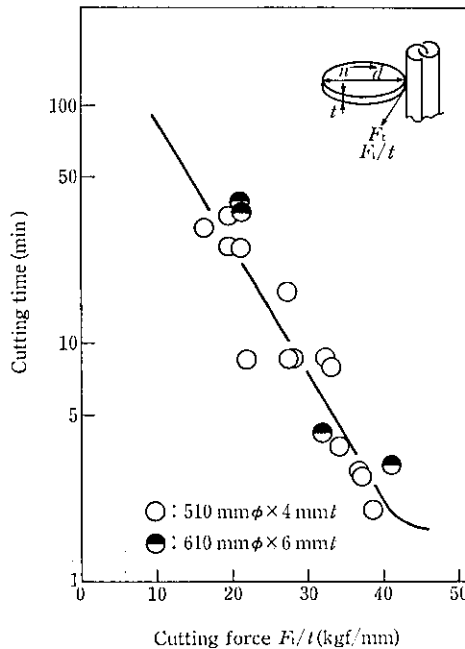


Fig. 3 Relation between cutting force and cutting time

きくなる。したがって切削力には適正な範囲がある。切削力を 25 kgf/mm 程度にすると直径方向の摩耗量は約 20 mm であった。この場合、1 枚の砥石で 1 本以上の鋼管矢板を切断することができ、かつ継手の切断所要時間も約 10 分となり切断条件としては適正である。

3.2 プラズマアークを用いた切断実験

3.2.1 実験方法

実験には Hypertherm 社製 HT-400S のプラズマアーク切断装置を用いた。電源本体から中間ステーションを経てケーブルを延長し、水深 20 m までの切断が可能のように改造されている。

Fig. 4 は水深最大 20 m までの模擬切断実験が可能な水圧タンクを示す。タンク内には供試鋼板を載せる走行台車があり、台車の速度はタンク外部の駆動装置により制御することが可能である。またタンクの側面にはトーチの取付調整座があり、供試鋼板の表面とトーチ先端との距離（スタンドオフ）を 8 mm とし、かつトーチの後

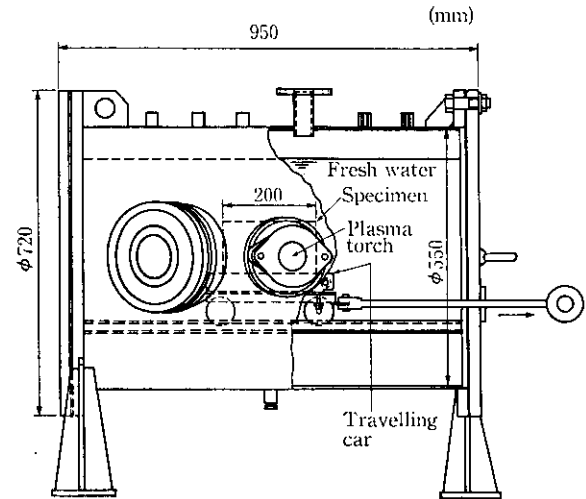


Fig. 4 Pressure tank

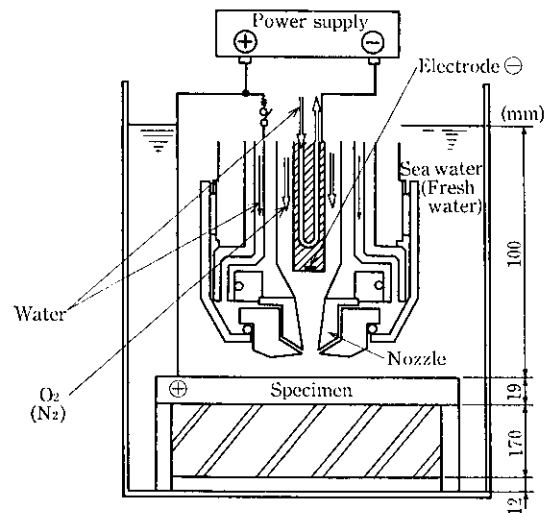


Fig. 5 Configuration of underwater plasma arc cutting experiment

退角を 15° とした。トーチの水深が 100 mm になるように水道水または海水を満たした。タンクの上部には窒素の供給口があり、タンクの内圧を調整した。実験条件としては、プラズマガスが酸素の場合、切断電流 260 A、ノズル口径 2.5 mm、ガス供給圧力 8.5 kgf/cm²G、ガス流量 50 l/min とし、窒素の場合はそれぞれ 400 A、4.2 mm、9.9 kgf/cm²G、80 l/min とした。供試鋼板は板厚 5 mm から 27 mm にいたる勾配のついた楔形とし、500-3 000 mm/min の速度範囲で走行させて板厚に対する限界切断速度を求めた。つぎに、水圧 0.01 kgf/cm²G の海水において切断速度を 1 500 mm/min に一定としスタンドオフを 5-27 mm の範囲に変化させたときの限界切断板厚とアーク電圧を求めた。

Fig. 5 にはトーチ先端の構造概要と、板厚 19 mm の供試鋼板の背面に粘性土または砂が存在する場合の切断実験の方法を示す。箱形の供試体の内部には粘性土または砂が加圧充填されている。水槽には海水を供給し、トーチの水深を 100 mm とした。実験においてはプラズマガスの種類、圧力、流量、切断電流、ノズル口径およびトーチ角度を上述の Fig. 4 の場合と同様にしたが、切断速度を 200-1 200 mm/min の範囲にし、かつトーチを下向き方向に取りつけて使用した。

なお、用いたプラズマトーチのノズルの先端外周部にはセラミックスが装着されていて、切断実験中はセラミックスとノズルの間隙からインジェクション水が噴出する。

3.2.2 水中における切断能力

水道水（海水）中において水圧が変化した場合の切断速度と限界切断板厚の関係を Fig. 6 に示す。限界切断板厚は切断速度の増大にともなって減少するが、水圧が $0.01 \rightarrow 2 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ へと増大した場合も多少減少する。プラズマガスの比較では、酸素と窒素で切断能力に顕著な相違は認められない。これは切断時の切断幅当たりの投入熱量（入熱/ノズル径）が両者ではほぼ等しいことで説明できる。

海水中ではその導電性からプラズマエネルギーの分散が一般的で

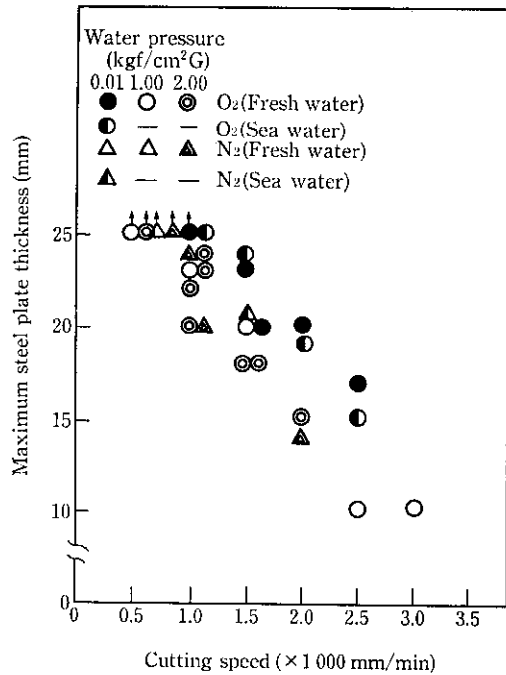


Fig. 6 Relation between torch cutting speed and maximum steel plate thickness in underwater cutting

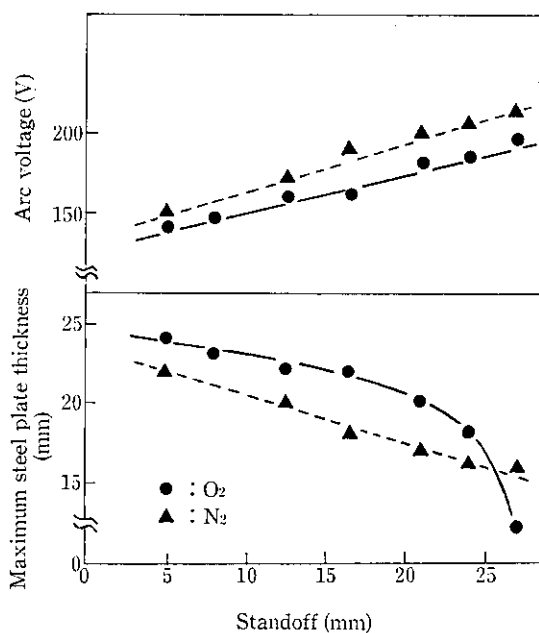


Fig. 7 Effect of torch standoff on plasma arc voltage and maximum steel plate thickness in underwater cutting

あり、プラズマ切断の実用は極めて困難である。本実験では水圧 $0.01 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ における水質の影響に関し、水道水と海水では大きな差は認められない。これは Fig. 5 に示されるプラズマトーチ先端部の構造が、メインアークの電流密度の低下原因となるシリーズアークの発生を抑制する機能を備えていることによる。具体的には、ノズル先端外周部のセラミックスによる絶縁とノズル内面での水によるピンチ効果である。後者に関し、銅製ノズルの機械的ピンチ効果で絞られ、さらにアーク柱の外周部とノズルとの間隙にインジェクション水を通過させ、その熱的ピンチでより細く絞ることから、ノズルを経由するシリーズアークの発生が抑制される。

Fig. 7 はスタンドオフと限界切断板厚、アーク電圧の関係を示す。水圧が $0.01 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ のときには、パイロットアークがメインアークに移行するスタンドオフは 8 mm であり、メインアークへ移行した後はスタンドオフが 27 mm となっても切断が可能である。ただし、スタンドオフの増大にともなってアーク電圧が上昇し、切断限界板厚は減少する。スタンドオフの増大による切断能力の低下はプラズマアーク柱の太径化、プラズマジェット流速の低下などによると考えられる。

3.2.3 背面に粘性土または砂が存在する場合の切断特性

海水中において厚さ 19 mm の鋼板の背面に粘性土または砂が存在する場合の切断実験結果を Fig. 8 に示す。いったん熔融した金属が、鋼板背面にある緻密な粘性土または砂の影響を受けて図中に模式的に示されるように切断溝部の表面上まではね返り凝固する。窒素プラズマで電流 400 A の場合には切断速度 800 mm/min で、また電流 260 A の酸素プラズマの場合には切断速度 $400\text{--}600 \text{ mm/min}$ において、凝固金属と切断溝の界面で再溶着部が存在しない完全切断領域が存在する。この完全切断領域では鋼板背面の切断方向の全長にわたって均一な切断幅が認められており、これはアークが安定していることと熔融金属の流れが一定しているためと考えられる。

一方、窒素プラズマおよび酸素プラズマともに切断速度を 200 mm/min と小さくした領域では、プラズマアークの陽極点が終始移動してアークが不安定になり、熔融金属の均一な流れが妨げられる。その結果、部分的に切断溝でブリッジを形成し、凝固金属が再溶着して不完全切断となる。

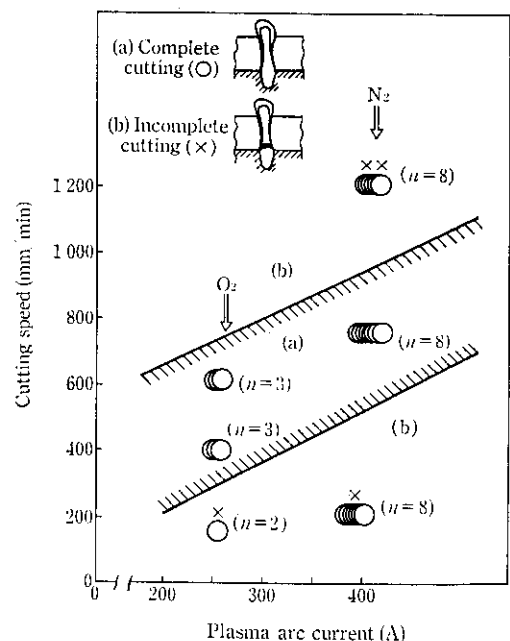


Fig. 8 Relation between plasma arc current and cutting speed

また、窒素プラズマで切断速度を1200 mm/minと大きくした領域では、熱量不足から熔融金属の流動が不完全となり、局部的に再溶着部を形成する。しかし、酸素プラズマでは熔融金属および固体切断面ともに酸化がより進行しているので、凝固金属の再溶着が生じたとしても軽度の衝撃により剝離する。したがって、本切断工法に適当な条件となる。

4 新型水中切断装置プラズマカッター

4.1 装置の構成

水中切断装置は主にプラズマアーク装置と砥石カッタ装置から構成される。Table 2に装置の主な仕様を示し、切断装置の全景をPhoto 1に示す。プラズマトーチにパイロットアークが発生し、メインアークに移行すると共にプラズマトーチは本管内で内壁に沿って巡回移動し、プラズマアークによる本管の切断を行う。

砥石カッタはPhoto 1に示されるように切断機構部に設けられており、切断時に継手の方向へ送りだされる。一方の継手を切断した後、切断機構部は巡回移動し他方の継手も切断する。この間、本管の断面は一部しか切断されていないため構造物としての剛性は十分あり砥石カッタのかみ込みトラブルの発生は防止される。

Table 2 Specifications of the newly developed underwater cutting machine

Pipe piles	
Diameter of pipe piles	800~1200 mm
Thickness of pipe piles	9~25 mm
Diameter of junction pipes	165.2 mm
Thickness of junction pipes	9, 11 mm
Plasma arc device	
Arc current	100~400 A
Open circuit voltage	400 V
Gas	O ₂ , N ₂
Torch travel speed	600~2000 mm/min
Grinder device	
Diameter of grinder	500~650 mm
Cutting time	~10 min/junction
Sensors	
Position of grinder	Displacement sensor
Position of plasma torch	Encoder

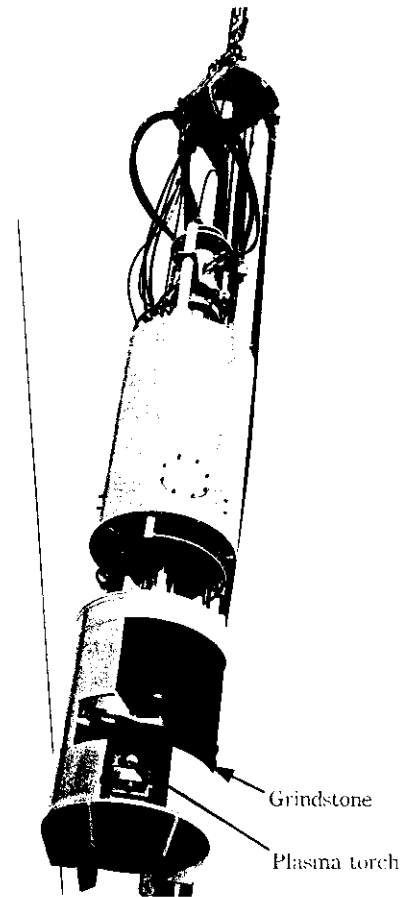


Photo 1 General view of the newly developed underwater cutting apparatus

4.2 確性試験

Fig. 9に新型水中切断機を用いた実規模確性試験方法を示す。供試体は800 mmφ×16 mm $\times$ 6000 mm $\times$ Lの溶接鋼管に圧縮強度240 kgf/cm²のモルタルを中詰めした継手管を溶接したものであり、深さ4 mの水槽中に設けた。供試体の切断位置では水深が2~3 mでありかつ鋼管背面に粘性土または砂がある。プラズマアークによる切断においては酸素プラズマを用い切断電流を260 Aとした。

Table 3に実験結果を示す。切断所要時間は継手が18分、本管が2.7分で合計21分であった。Photo 2は砥石カッタによる切断状況を、Photo 3はプラズマアークによる切断状況を示す。切断後の供

Table 3 Underwater cutting test results of interlocked steel pipe piles (Main pipe, 800 mmφ×16 mm $\times$; Junction pipe, 165.2 mmφ×9 mm $\times$)

Test No.	Cutting device	Cutting object	Cut length (mm)			Cutting time (min)
			Depth	Width	Circumferential	
1	Grindstone ^{*1}	Junction 1 ^{*2}	187	670		9.0
		Junction 2 ^{*2}	172	630		9.0
	Plasma arc (O ₂)	Main pipe			2440	2.7
2	Grindstone ^{*1}	Junction 1 ^{*2}	166	649		8.0
		Junction 2 ^{*2}	168	654		8.5
	Plasma arc (O ₂)	Main pipe			2440	2.7

*1 Grindstone blade: 610 mmφ×6 mm $\times$

*2 Junction pipes are filled with mortar.

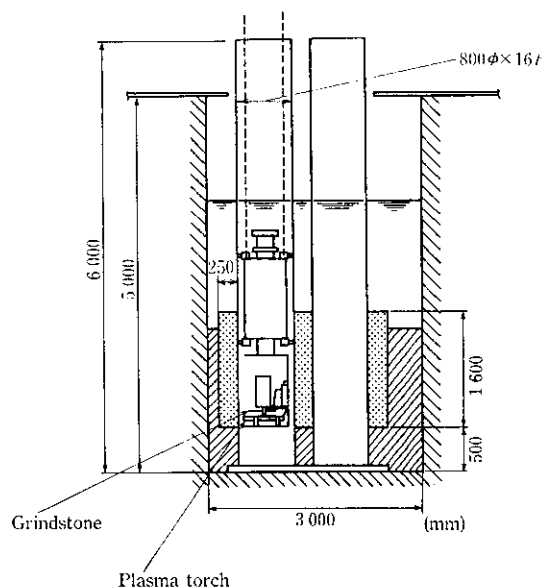


Fig. 9 Configuration of underwater cutting experiment using the cutting machine



Photo 2 Underwater cutting of junction pipe and main pile by grindstone

試体を観察した結果、Photo 4 に示すように継手と本管の切断高さが同一レベルで精度よく一致しており、かつ確実な切断が可能であった。

5 結 言

仮締切鋼管矢板井筒のノンプレカット工法に対応するために、水中切断の基本実験を行って、砥石カッターとプラズマアーク切断を併用した水中切断工法（装置）の開発を行った。おもな結果は次のとおりである。

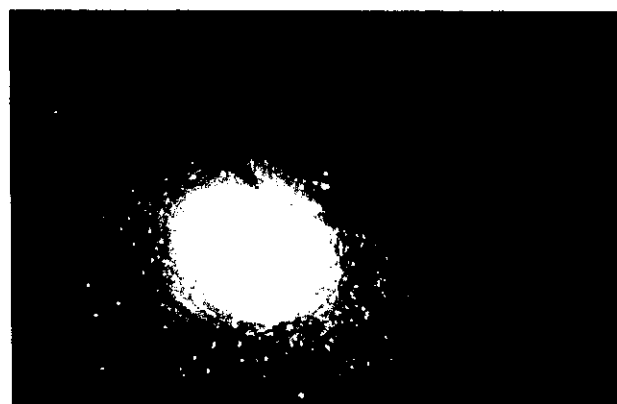


Photo 3 Underwater cutting of main pile pipe by plasma arc



Photo 4 Main pile pipe and junction pipes after cutting by plasma arc and grindstone

- (1) 水中において砥石カッターの回転所要動力は、高周速になる程指数関数的に増大する。そのため、空気中において慣用されている高周速切断と異なり、低周速切断とする方がよい。
- (2) 水中においてもプラズマアークによる鋼管の切断速度は極めて大きい。酸素プラズマ、負荷電流 260 A の場合、直径 800 mm、厚さ 16 mm の鋼管を約 2 分間で切断することができる。
- (3) 新型水中切断装置は、継手管を砥石カッターで切断し、本管を非接触タイプのプラズマアークで切断することができる。切断の確実性にすぐれ、継手管と本管を水中で定められた同一高さ位置で精度よく切断するとともに、直径 800 mm、厚さ 16 mm の鋼管矢板の切断を約 20 分間/本と高能率で行うことができる。

この水中切断装置プラズマカッターはノンプレカット工法の鋼管矢板の水中切断の他に、鋼管杭の高速水中切断にも用いることができる。

おわりに、水中切断装置の開発において、試作機の製作にあたりご協力をいただいた株式会社昭栄の関係各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 斎藤 伸, 白石 環, 野中節男: 川崎製鉄技報, 8 (1976) 2, 118
- 2) 栗田邦夫, 市川文彦, 武村忠志, 白石 環: 川崎製鉄技報, 14 (1982) 4, 120
- 3) 楠本 操: 製鉄研究, No. 306 (1981), 58