
鋼管杭の現場全自動溶接工法－KH・P 工法について－

Full Automatic Site Welding Process for Steel Pipe Piles -KH・P Process-

高橋 千代丸(Chiyomaru Takahashi) 金子 忠男(Tadao Kaneko) 行友 浩(Hiroshi Yukitomo) 赤秀 公造(Kozo Akahide)

要旨：

わが国の土木建築構造の基礎には軟弱基盤と地震を考慮して杭工法を多用するが、信頼性と溶接性にすぐれていることから鋼管杭が使用されている。「KH・P 工法」は現場における鋼管杭継手溶接を自動化し、継手の溶接性能を向上させる目的から、わが国で最初に炭酸ガス溶接を現場溶接に適用した溶接工法である。主要装置は磁輪を有する溶接ヘッドとワイヤー送給装置からなり、これらは2台の台車に組みこまれており、これらを杭周に沿って案内するガイドレールは、セグメント状に分割されており、しかもあらかじめ工場に取り付けられたガイドレール保持用鋼片に上載するのみで開先から一定の距離にセットされる。「KH・P 工法」の現場適用化は3回の現場実験により確認され、十分にその効能が立証された。

Synopsis：

In Japan, taking into account of soft ground and earthquake, steel pipe piles are popularly used for base construction which have much reliability and weldability. KH・P process is an unique welding method adopted for the first time into a full automatic CO₂ arc welding at construction site and has good joint efficiency. Main equipment for KH・P process includes a welding head and a wire feeder which are automatically driven by magnetic wheels. A special guide rail on which the above two components run automatically is divided into two or three segmentary pieces, and hung on several suspenders which are made of small steel piece and welded to the outer surface of upper pile previously in a factory. Hence, the two welding components can move along a specified distance from welding groove. The field adaptability and efficiency of KH・P process are proved by three times welding tests at actual construction sites.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

鋼管杭の現場全自動溶接工法

— KH-P 工法について —

Full Automatic Site Welding Process for Steel Pipe Piles

— KH-P Process —

高橋 千代丸*

Chiyomaru Takahashi

金子 忠男**

Tadao Kaneko

行友 浩***

Hiroshi Yukitomo

赤 秀 公 造****

Kozo Akahide

Synopsis:

In Japan, taking into account of soft ground and earthquake, steel pipe piles are popularly used for base construction which have much reliability and weldability.

KH-P process is a unique welding method adopted for the first time into a full automatic CO₂ arc welding at construction site and has good joint efficiency. Main equipment for KH-P process includes a welding head and a wire feeder which are automatically driven by magnetic wheels. A special guide rail on which the above two components run automatically is divided into two or three segmentary pieces, and hung on several suspenders which are made of small steel piece and welded to the outer surface of upper pile previously in a factory.

Hence, the two welding components can move along a specified distance from welding groove. The field adaptability and efficiency of KH-P process are proved by three times welding tests at actual construction sites.

1. 結 言

近年、土木建築構造物は長大化の一途をたどり、国内外の大型プロジェクトに呼応してその傾向はますます顕著になっている。これら構造物の基礎工法にはその重要性や地盤の良否によっても

異なるが、鋼管杭工法が多用される傾向にある。事実、鋼管杭の需要は年々伸び、昭和48年度には実に100万トンを越えるに至った。鋼管杭の需要が伸張すれば、当然その継手溶接の度も増大するが、工場溶接、現場溶接のいかんをとわず継手溶接部の品質管理が安全設計の面から最重要課題となる。鋼管杭の継手溶接は輸送や杭打機

* エンジニアリングセンター建設開発部鋼構造研究所構造研究室主任研究員

*** エンジニアリングセンター建設開発部土木開発室

** エンジニアリングセンター建設開発部鋼構造研究所構造研究室・工博

**** 技術研究所溶接研究室主任研究員

の能力、あるいはその他施工上の問題から現場施工となることが多い。元来、これらの溶接は溶接工によって手溶接されていたが、人手による作業のため非常に能率が悪く、土工事が機械化され、建設作業能率が向上した現代では時代的要求に逆行するものである。したがって、さらに高能率溶接法として手溶接の2、3倍の作業能率がえられるノーガス半自動溶接法が昭和40年頃より考案実用化された。これは設備が簡便かつ安価であり、現場において風の影響を受けることが少ない利点とあいまって、いまや全国的に普及している。この溶接法は周知のとおり、従来の溶接棒の代わりに溶接ワイヤーが自動的に供給される半面、溶接開先に沿う溶接トーチの移動は依然として溶接工が行なわねばならぬため、その運棒技術によって継手の良否が大きく左右される。同法を採用する限り、継手性能に対する管理対象はもっぱら溶接工の技量に向けられるが、業界が要望するほどの俊腕溶接工は産業人口のサラリーマン化傾向に伴って年々不足している。

以上のような鋼管杭現場溶接の現況を考慮するとき、できるかぎり人的要素を省除した、すなわち高度の溶接技術を必要としない自動溶接法の出現が待望されるし、ここ数年来業界では、この機運が高揚しており、手作業の軽減と作業の高能率化をテーマに溶接機ならびにこれを運用する工法を開発中である¹⁻⁴⁾。このような業界の動向を踏まえて、当所では関連部課の協力のもとに鋼管杭現場継手全自動溶接工法として「KH-P工法」^{3,4)} (Kawatetsu Hitachi-Pipe pile process) を完成させた。

「KH-P工法」は、将来における土木建築構造物長大化現象に伴う基礎杭の継手効率向上化を十分考慮のうえ、溶接法そのもののグレードアップを計るため、他社工法には例をみない炭酸ガスアークシールド溶接法(以下CO₂溶接法と称す)を導入した。すなわち、現行のノーガス溶接法は手溶接に比べて衝撃および曲げ性能にいささかの疑問を残すため、鋼管杭以外の溶接構造物で設計上最高級の品質を要求される個所では使用されておらず、また、高電流を通じ、多大の溶着量を得る方法であるにもかかわらず溶込みが以外に浅い。

したがって、完全な継手を得るためには、ある程度開先部にルート間隔を設け溶込みを深くする必要があるが、現場における杭の建込み作業の面からはルート間隔を設けない直結型が最良である。この点、CO₂溶接法は非常に溶込みの深い溶接法であり、さらに曲げおよび衝撃特性ともにノーガス溶接法よりはるかに良好であるから、現場溶接法として何らかの防風対策が講じられさえすれば最適であるといえる。「KH-P工法」は以上のように溶接効率ならびに溶接性能がきわめて良好であるため、特に軟弱地盤の多いわが国の港湾構造物、あるいは海洋構造物基礎などのように大口径長尺鋼管杭に適用すれば大なる効力を発揮するのである。

本報文では「KH-P工法」の概要と施工法、ならびに現場における施工実験とその結果について述べる。

2. 「KH-P 工法」の概要

本工法は(1)電源、(2)溶接装置、(3)溶接継手、(4)溶接材料で構成されるが、それらの構成と接続をFig. 1に示す。さらに構成各部の概要と仕様を示せば以下のとおりである。

2.1 電 源

ノーガス溶接用の電源とは異なり、3相200Vを使用するが、一般に配線されている動力用電源はこの使用を満足しており、本工法のため特別に配慮する必要はない。

2.2 溶接装置

溶接装置は(a)溶接用電源、(b)溶接ヘッドおよびワイヤー送給装置、(c)ガイドレール、(d)局部防風装置、(e)備品、とからなりおのおのは以下に示すような内容となる。

2.2.1 溶接用電源

一般に用いられている交流垂下特性を有する電源では、CO₂溶接のように細径ソリッドワイヤーに大電流を通電し、ワイヤーの送給速度を高めて大量の溶着金属を得る高能率溶接法に対し安定し

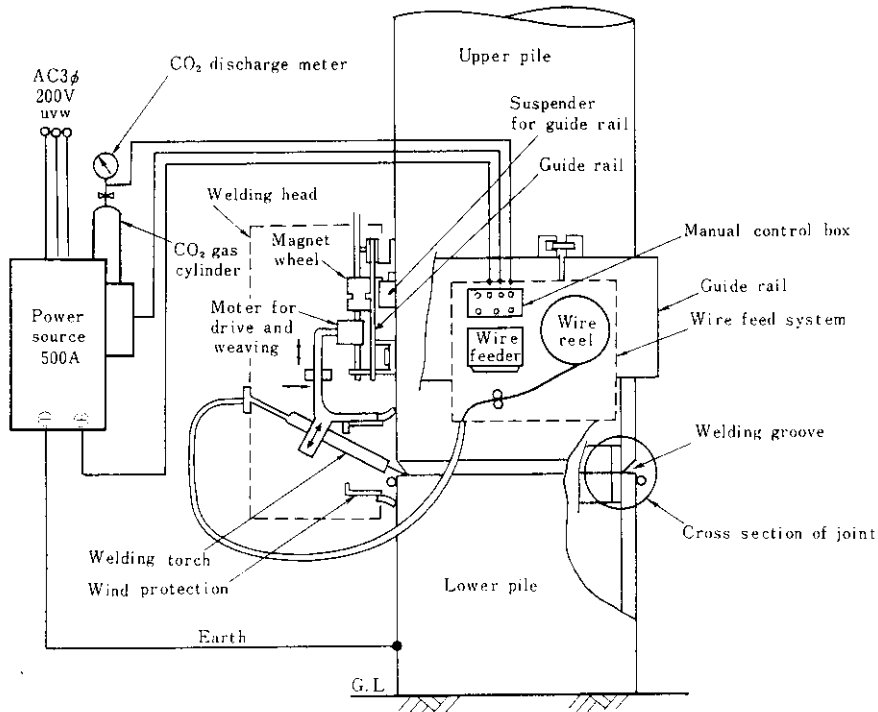


Fig. 1 "KH-P process" welding system

たアークが得られないうらみがある。したがって、本工法では安定したアーク特性を有する直流定電圧特性電源を用いることにした。ノーガス溶接にあっても同様にワイヤー径を細いものにすれば、大電流を通電することにより溶着効率を高めることができるし、これによりトーチの軽量化が可能となり溶接ヘッドの重量軽減もできることから、ワイヤー径 3.2φ に代って 2.4φ が使用されつつある。

作業性と能率性を第一義とする全自動溶接法では、積極的に高速送給による溶着効率の向上に意を配るべきであろう。

2・2・2 溶接ヘッドおよびワイヤー送給装置

一般に全自動溶接工法とは、ワイヤーの自動送給に加えて溶接トーチの移動をも自動化して、わずかに溶接開先部の不整に起因するトーチのねらい位置や、電流電圧の微調整のみをオペレーターが実施する工法である。最も単純化した全自動溶接機構としては、ワイヤー供給装置が地上に固定

され、トーチのみが杭周を自走する形式が考えられるが、ワイヤー送給技術に難点がある。したがって「KH-P工法」ではトーチとワイヤー供給装置とが、同時に一体となって杭周を溶接線に沿って自動走行するシステムを採用した。しかし、溶接装置の鋼管杭への着脱を容易ならしめるためには、その自重を軽減する必要がある、本工法では特に作業性を重点的に考慮して、他に例をみない溶接トーチとワイヤー送給装置とを構造的に2分する分割方式を採用した (Photo. 1 参照)。この利点は自重軽減のほかに、たとえば溶接トーチはそのまま使い、ワイヤー送給装置を交換することにより、炭酸ガス溶接とノーガス溶接とを簡易に使い分けることが可能となる点である。すなわち、炭酸ガス溶接を行なっていて、風速・風力が急に強まり炭酸ガス溶接の限界値(「KH-P工法」では局部防風装置の導入により風速 10m/sec まで溶接可能である)を越えた場合には、炭酸ガス用ワイヤー送給装置をノーガス用のそれと交換するだけで、風の影響を受けることの少ないノーガ

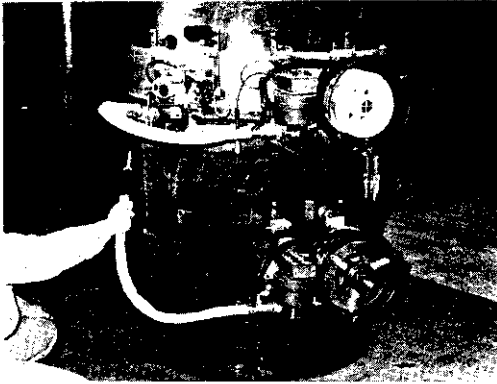


Photo. 1 Welding equipment for "KH-P process"

- (1) Welding head
- (2) Wire feeder for CO₂ gas arc welding
- (3) Wire feeder for non-gas arc welding

ス溶接に移行することができる(以下これらを「KH-P工法・CO₂法」および「KH-P工法・ノーガス法」と称す)。また、分割方式では溶接ヘッドが単純となりスペース的に余裕を生ずるため、この種溶接装置に類をみないトーチウィーピング機構を付加することが可能となった。これにより前述の炭酸ガス溶接の優位性とあわせて、溶接における累層技術が簡単かつ確実性を増し、溶着金属の機械性能を一段と向上させる結果となる。

溶接ヘッドならびにワイヤー送給装置は、**Photo. 1** に示すとおり磁輪駆動方式になっており、後述するガイドレールの上端に案内されて、その側面に磁力吸着しながら回転走行する。磁輪駆動用モーターは溶接ヘッドのみに設置されており、ワイヤー送給装置は単に前者に連結され牽引あるいは推押されて併走することとなる。さらに溶接ヘッドおよびワイヤー送給装置は、トーチが溶接線と一定間隔を保持しながら走行する必要があるため、杭周に的確に取り付けられたガイドレールに嵌合するガイドローラー2個と、安定走行のための補助ローラー2個とをそれぞれ有している。「KH-P工法」ではさらに溶接ヘッドからトーチのみを抜き出せば、そのまま半自動溶接としても使用可能となるから、簡単な補修溶接やアース板の固着などにも本装置で代用できることになる。

2・2・3 ガイドレール

鋼管杭はそのほとんどが側壁に余盛ビードが残存するスパイラル鋼管であるが、「KH-P工法」をこれらに適用する場合、上述のように装置が磁輪にて吸着走行するため、トーチの走行軌跡がスパイラルビードを通過する際に大きく乱される。その結果、溶着金属のビード外観を損なったり、場合によっては装置の杭周面からの離脱を招くことがある。これらを回避するため、トーチの走行軌跡を溶接線と空間的に平行ならしめ、かつ平滑なる磁輪吸着面を有するガイドレールが考案された。ガイドレールの所要機構としては上記諸条件を満足するほかに、当然のことながら溶接ヘッドおよびワイヤー送給装置の重量を支えるとともに、鋼管杭への着脱が簡便であることが要求される。

本工法では装置の重量を支えると同時に、ガイドレールを開先から等距離に正確に取り付けるためのガイドレール保持用鋼片(**Fig. 2** 参照)を、あらかじめ工場において上杭外周に沿って適数個所定位置に正確に固着させておき、現場では単にセグメント状に3分割されたガイドレール(杭径が小さい場合は2分割)を保持用鋼片に引掛けるだけでガイドレールの位置決定を行ない、その後セグメントをその端部に取り付けられているレバーとスプリングとで締結閉合させる方式を採用した(**Photo. 2** 参照)。ガイドレールは杭表面から一定間隔だけ張りだしており、この隙間を利用して鋼管杭のスパイラルビードを跨越し、こ

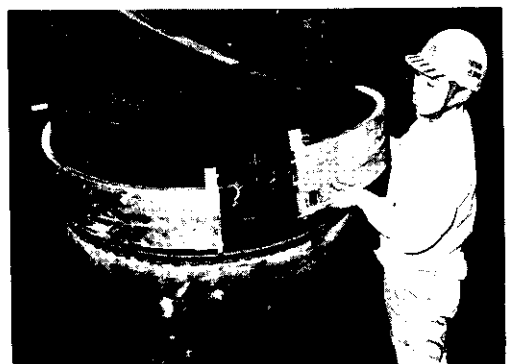


Photo. 2 Guide rail divided into 3 pieces

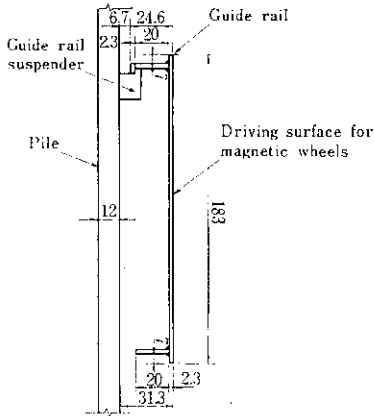


Fig. 2 Sectional figure of the guide rail

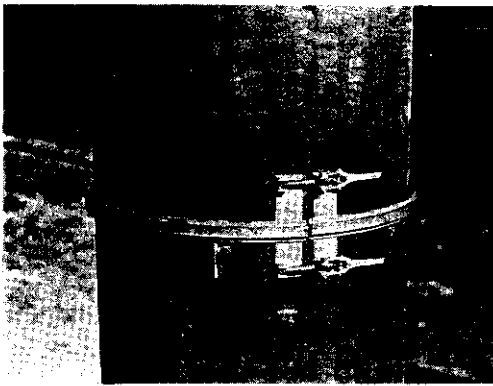


Photo. 3 Simple type guide rail for "KH-P process"

れを回避するようくふうされているが、断面を示せば Fig. 2 のとおりである。なお、鋼管杭が電縫鋼管や U.O.E. 鋼管の場合、あるいはスパイラル鋼管でもビードの部分削除して平滑に仕上げる場合には、Photo. 2 のガイドレールでなく、Photo. 3 に示すような簡単なガイドレールを用いても十分効果を発揮できる。しかし、Photo. 2 のガイドレールのように高性能なものを用いれば、溶接作業中の溶接管理（主としてトーチの微調整）を必要最小限にとどめることができ、作業性はきわめて向上することになる。すなわち、所要の溶接条件を設定しさえすれば極端な場合素人でも溶接が可能となる。

2-2-4 局部防風装置

前述のとおり「KH-P 工法・CO₂ 法」は、風の影響をトーチ周辺に設置した局部防風装置によって低減させ、現場適用化を可能としたものである。局部防風装置は Fig. 3 に示すような諸寸法を有する箱状のもので（以下防風箱と称す）、溶接時に発生するスパッターの付着を防止する目的から銅板製とした。当然のことながら防風箱はアークシールドに用いる CO₂ ガスの風による攪乱を防止し、そのシールド性が妨害されぬようにするのが第 1 目的であるが、トーチ近傍を遮断するため、溶接作業者のアーク端ならびに溶融池観察を妨げるため、オープンアークの特長を発揮できなくなる。したがって、「KH-P 工法」で採用する防風箱としては上記防風効果と作業性を十分加味し、種々の防風性能実験より Fig. 3 のような防風箱が開発された。

坪井らの基礎実験⁵⁾によれば、Fig. 4 に示すように高さ 100 mm のガラス枠をノズルにセット

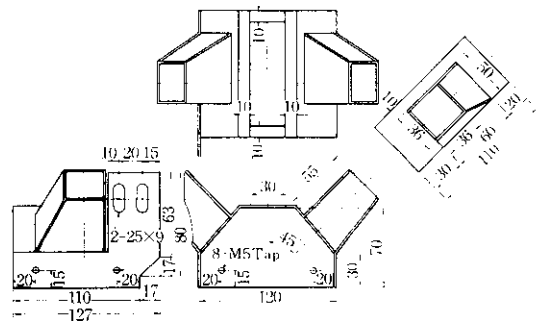


Fig. 3 Shape and dimension of wind protection

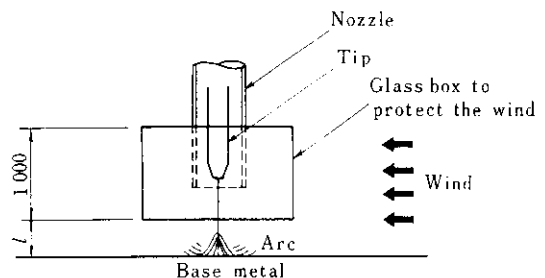


Fig. 4 Wind protection test using glass box

し風速 0～8 m/sec, CO₂ 流量 20～100 l/min における CO₂ の攪乱状況をガラス棒と母板の間隔 l をパラメーターとして種々変化させた場合について特殊装置を用いて観察したところ、 l が 3 mm 以上になると防風効果がなくなることが判明した。一方、防風箱は溶接ヘッドトーチ部に取り付けられており、その走行軌跡はガイドレールの磁輪吸着面と相似となるが、ガイドレールの製作精度あるいは鋼管杭の偏平化、開先部の突起などを考慮すれば、防風箱と鋼管杭表面との間隔は 10 mm 程度とするのが妥当である。これは上記実験結果と相反するが、「KH-P 工法」では防風箱と管表との隙間を 10 mm とし、これを完全に密閉するため溶接時発生する熱のことも十分考慮のうえ、ガラス繊維製の帯布を用いることにした。ガラス繊維の有する弾力性のためその先端は常に管表を摺動するため、防風箱と管表に介在する隙間はほとんど消滅する。

防風箱前面はトーチ挿入用開口部と熔融池を斜め側方から効果的に観察できる左右一對の観察用窓を必要とする。トーチ挿入用開口部は、溶接時に累層順にしたがって溶接線と直角方向にトーチ角度を回転調整し、また溶接線と平行方向のトーチ角度調整（トーチの前進角、後退角）するのに必要最小限としたが、この部所より進入する風は、CO₂ ガス噴射方向と平行であるためガス流攪乱度は小さいと考えられる。熔融池観察用窓は機能と防風効果の面から、その開口部はできる限り小さいものとし、防風箱側面から突出した上方に傾斜する角錐台状のものを採用した。いうまでもなく本防風装置は「KH-P 工法・ノーガス法」では不要である。

2.2.5 備 品

その他溶接装置の付属品として、炭酸ガスポンペならびに炭酸ガス流量計が必要である。炭酸ガスポンペは一般に市販されている溶接用炭酸ガスを使用すれば良いが、30 kg 入り 1 本で 1100 ϕ × 9.5 t の鋼管杭を大略 9～10 本溶接することが可能である。炭酸ガス流量計は流量調整範囲が 120 l/min 以下で可能なものを用いれば良い（通常使用流量は 50～60 l/min）。

2.3 継 手

全自動溶接法では、最初に設定した溶接条件で最後まで溶接するところに最大の利点を有するから、開先部に目違いや肌すきの少ない安定した継手が必要となるが、本工法では半自動溶接継手として長年の実績をもつ当社の「リバージョイント」をそのまま用いることにした（Fig. 5 参照）。周知のとおり「リバージョイント」は、高能率溶接法に適するように十分な厚さを有する裏当てリングと、たれ落ち防止用の丸棒が固着されているため、きわめて安定した溶接作業を実施できる点、およびこれらの付属品がすべて工場に取り付けられているから、現場では単純に上下杭を突き合わせるだけで高精度の継手が得られる点に特徴を有する。本工法ではこれらの特徴を生かし、炭酸ガス溶接に関しては本来溶込みが深いためルート間隔を設けない継手とした（Fig. 5(a) 参照）。したがって、2 mm のルート間隔を有する従来のノーガス用継手 Fig. 5(b) に比して肉厚 9.5 mm の鋼管

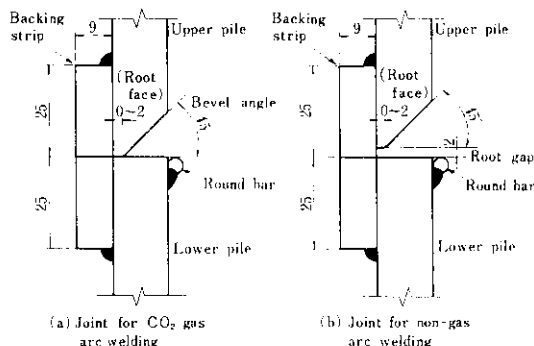


Fig. 5 Typical groove-joint design for “KH-P process”

杭で約30%、肉厚12.7mmのそれでは約20%の開先断面積減少となる。この事実からも「KH-P 工法・CO₂法」がきわめて有効な溶接法であることが裏付けられる。

2.4 溶接材料

本工法に用いる溶接ワイヤーは炭酸ガス用としてKC-50 (1.6 ϕ)、またノーガス用としてKOA-50D (2.4 ϕ)であり、これらは両方とも50 kg/mm²

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of the welding wires

Welding wires	Chemical composition (%)					Mechanical properties			
	C	Si	Mn	P	S	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Impact value νE_0 (kg·m)
K C-50 (1.6 ϕ)	0.11	0.46	1.21	0.015	0.014	51	59	30	13.5
K O A-50 D (2.4 ϕ)	0.08	0.07	0.72	0.013	0.007	42	57	29	5.0

鋼用の溶接材料であるため、鋼管杭用鋼材として最も需要が高い S T K 41 材はもちろんのこと、S T K 50, S M 50 材鋼管にも適用される (Table 1 参照)。

3. 「KH-P 工法」の施工および現場施工例

3.1 「KH-P 工法」の施工順序

「KH-P 工法・CO₂ 法」を対象としてその施工順序を列挙すれば以下のとおりである。ただし、この場合溶接用電源の一次側配線は完了しているものとする。

①ガイドレールを鋼管杭の所定位置に懸架設置する。

②溶接ヘッドをガイドレールにセットする。

③ワイヤー送給装置をガイドレールにセットする。

④溶接ヘッドとワイヤー送給装置を連結棒でつなぐ。

⑤2次側キャップタイヤコードとガスホースとをワイヤー送給装置に接続する。

⑥溶接ヘッド駆動用ケーブルをワイヤー送給装置に接続する。

⑦CO₂ ガス流量および圧力を適正值に調整する。

⑧アース線を接続する。

⑨手もと操作箱の電流、電圧、溶接速度、ウィーピング幅設定用ツマミをそれぞれ適正值にセットする。

⑩溶接開始用ボタンを押してアークを出す。

⑪最後に溶接停止ボタンを押して溶接を完了する。

以上の11ステップで溶接が完了するが、ステップ①～⑨は溶接のための準備であり、通常鋼管杭径の大小を問わず3～4 min で完了する。ステッ

Table 2 Standard welding condition of "KH-P process"

Welding procedure	Thickness (mm)	(a) 0 ~ 3 mm misalignment between upper and lower pipe						(b) 3 ~ 5 mm misalignment between upper and lower pipe						CO ₂ gas discharge (l/min)
		Pass number	Current (A)	Voltage (V)	Velocity (cm/min)	Weaving width (mm)	Torch angle (degree)	Pass number	Current (A)	Voltage (V)	Velocity (cm/min)	Weaving width (mm)	Torch angle (degree)	
KH-P process CO ₂ method	9.5	1	350~400	32~35	30~45	Arbitrarily	15~20	1	280~350	29~33	40~60	Arbitrarily	15~20	40~80
		2	280~350	29~33	40~60	Arbitrarily	0~15	2	350~400	32~35	30~45	Arbitrarily	15~20	
		3						3	280~350	29~33	40~60	Arbitrarily	0~15	
	12.7	1	350~400	32~35	35~50	Arbitrarily	15~20	1	280~350	29~33	40~60	Arbitrarily	15~20	40~80
		2	350~400	32~35	30~45	Arbitrarily	15~20	2	350~400	32~35	25~35	Arbitrarily	15~20	
		3	280~350	29~33	40~60	Arbitrarily	0~15	3	280~350	29~33	35~45	Arbitrarily	0~15	
Non gas arc welding	9.5	1	330~380	24~28	20~28	Arbitrarily	15~20	1	330~380	24~28	25~30	Arbitrarily	15~20	
		2	300~350	24~28	25~35	Arbitrarily	0~15	2	330~380	24~28	25~30	Arbitrarily	15~20	
		3						3	300~350	24~28	25~35	Arbitrarily	0~15	
	12.7	1	330~380	24~28	25~30	Arbitrarily	15~20	1	Same as (a) column					
		2	330~380	24~28	20~25	Arbitrarily	15~20	2						
		3	300~350	24~28	25~35	Arbitrarily	0~15	3						

ブ⑩を経過すれば、溶接作業は自動的に進行するが、時おりビード外観およびアークの状況を観察しながら溶接条件設定に誤りが無いことを確認し、もし誤りがあれば調整を行なう。「KH-P工法・ノーガス法」の場合にはステップ③のワイヤー送給装置をノーガス溶接用のそれと交換し、ステップ⑤のガスホース接続とステップ⑦を省略すれば同様の要領で溶接される。

3.2 溶接施工条件

継手ならびに溶接材料、溶接環境が標準の場合の適正溶接条件をTable 2に示す。Table 2の諸値はあくまで標準値であるため、継手や溶接材料などが異なる場合は適宜若干の調整が必要である。

3.3 継手の性能

本工法による継手性能試験としてはまず、通常

実施されている簡便法としてのJIS標準試験を行ない、ついで実杭を想定した実物大圧縮曲げ試験を行なってその継手性能を確認した。

3.3.1 JIS 標準試験

JISに規定される継手性能試験として強度に関して引張試験、延性に関して曲げ試験、靱性に関しては衝撃試験を実施した。溶接条件および試験結果について「KH-P工法・CO₂法」と現在汎用されているノーガス半自動溶接法によるものとを比較し表示すれば、それぞれTable 3, 4のとおりである。表より明らかなように「KH-P工法・CO₂法」で溶接された継手は非常にすぐれており、特に衝撃値に関してノーガス溶接法と比較すれば顕著な差異がみうけられ、また溶接施工時間も大幅に短縮されることがわかる。

Table 3 Welding condition (in the case of 800φ×9.5t pile)

Welding procedure	Pass number	Welding current (A)	Welding voltage (V)	Welding velocity (cm/min)	Width of weaving (mm)	Torch angle (degree)	Arc time (min)	Setting time of welder (min)	Other need time (min)	Total time (min)
KH-P process CO ₂ method	1	390	35	31	3.5	20	8.1	3.0	—	16.1
	2	290	31	50	0	5	5.0			
Non-gas arc welding	1	400	27	22.5	Small	15~25	11.1	—	6.0 (slag removal)	25.1
	2	350	26	28	0	5~10	9.0			

Table 4 Test results of the welded joint

Welding procedure	Number of test piece	Macrographic examination		Tensile test		Bend test				Impact test vE ₀ (kg·m)
		Defect	Judge	Braking stress (kg/mm ²)	Broken place	Face bend		Root bend		
						Defect	Judge	Defect	Judge	
KH-P process CO ₂ method	1	No defect	Good	48	Mother metal	No defect	Good	No defect	Good	16.2
	2	2 pin holes	Good	49	Mother metal	No defect	Good	No defect	Good	14.8
Non-gas arc welding	1	1 pit	Good	47	Mother metal	No defect	Good	No defect	Good	4.1
	2	1 pin hole	Good	49	Mother metal	No defect	Good	1 pit	Good	4.6

* Estimation standard:

Results of the macrographic examination are judged good when they have no remarkable defect as incomplete penetration.

Results of the bending test are judged good when they have smaller crack than 3mm, fewer defects than 10 and smaller value in total defect length than 7mm.

3.3.2 実物大圧縮曲げ試験

構造物の基礎に用いられる杭は、その上載荷重による圧縮力と地震や風圧によって、上部工から伝達される水平力に起因する曲げモーメントの作用を同時に受ける。したがって、基礎杭が中間に継手を有し、それが現場溶接にて施工されている場合に示す外荷重に対する継手部の性能は是非とも確認されていなければならない。以上の主旨からここでは **Photo. 4** に示すように S T K 41, $800\phi \times 12.0t \times 4000l$ のスパイラル鋼管 2 本を「KH-P 工法・CO₂法」にて溶接施工し、全長 8000 mm の鋼管杭を形成した。これを写真のように両端でヒンジ付サドルで支え、支間 7000 mm の単純ばりとし、2 基の油圧ジャッキ (300 t, 200 t) で管軸方向に圧縮力、また溶接継手部を中心に 2000 mm の曲げスパンを設け、载荷ばりを介し

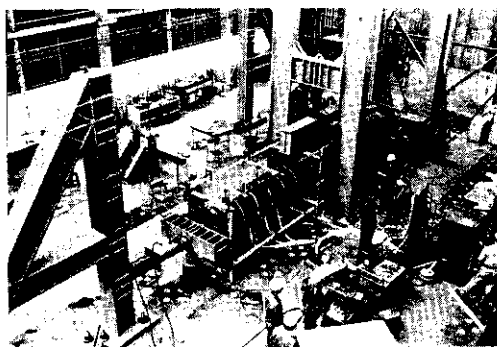


Photo. 4 The aspect of testing in real size steel pipe pile with welded joint by "KH-P process"

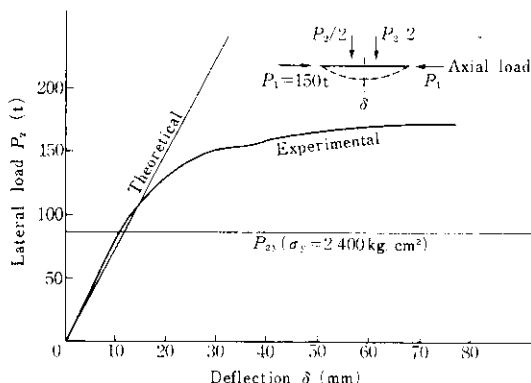


Fig. 6 Load-deflection curve at the bottom of welding joint

て曲げモーメントを導入した。すなわち、軸方向圧縮力 P_1 と純曲げモーメント $1.25P_2 \cdot t \cdot m$ を作用させたが、軸力は上述のように基礎杭の上載荷重を想定し、実験中は 150 t として終始一定に保持した。しかるのち、鉛直荷重 P_2 を漸次増加させて破壊に至らせしめた。供試体の中央溶接部下端のたわみ量を δ として P_2 - δ 曲線を描けば **Fig. 6** に示すとおりである。図中には比較対照のため供試体の両端を単純支持された軸力、および曲げモーメントを受ける単純ばりとみなした場合の同点のたわみ計算値を付記した。実験値は計算値に比して弾性域では若干剛性が高いことがわかる。供試体の最終耐力は $P_{2max.} = 171.5t$ ($M_{max.} = 214.4 t \cdot m$) であったが、計算より得られる最終耐力 P_{2pc} は $\sigma_y = 2400 \text{ kg/cm}^2$ とすれば 134.4 t, また供試体の素材試験より得られた降伏応力 $\sigma_y = 3100 \text{ kg/cm}^2$ を用いれば 177 t で、実験値よりわずかに大きい。実験における人為的誤差や鋼管の局部変形による 2 次応力などを考慮すれば、耐力的に同等とみなされ特に問題はないといえる。なお、中央部の最大たわみは約 7.8 cm あり、これはスパンのほぼ 1/100 に相当する。供試体の最終破壊形式は、曲げスパン内圧縮側における局部座屈であったが、座屈は溶接部を節としてほぼ左右対称に 2 波ずつを生じ、その波長は約 260 mm であった。座屈波形およびその分布から、溶接部は外荷重に対してスチフナーの役目を果たしていることが容易に明察された。座屈の状況は **Fig. 7** に示す管軸方向のひずみ分布図からも判明するが、

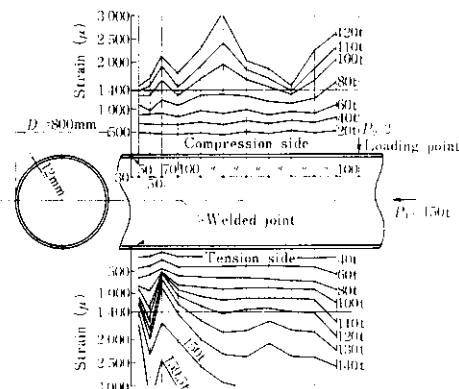


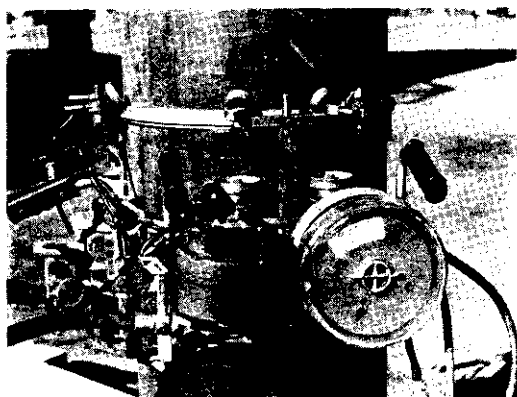
Fig. 7 Axial strain distribution along the upper compression side and the lower tension side

最終破壊時において溶接部には全く異状は見受けられず、実験終了後に採取されたマクロ試験片からも亀裂の発生は見受けられなかった。以上により、「KH-P工法・CO₂法」で施工された溶接継手の性能には全く問題がないことが明らかである。さらに細部については著者らの報告^{6,7)}を参照されたい。

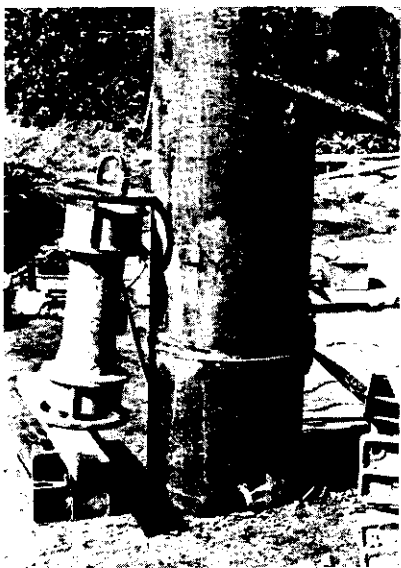
3.4 「KH-P 工法」現場施工例

「KH-P工法」は開発着手（昭和46年9月）より約2.5年を経てようやく完成の域に達し得たが、その間数多くの室内実験と3回にわたる現場

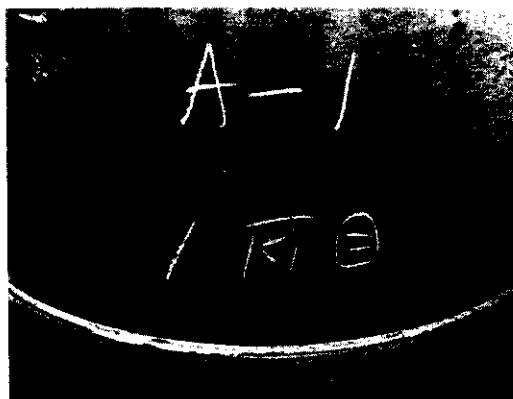
施工実験が実施された。すなわち、それらは溶着効率ならびに溶着金属の機械的性能が非常にすぐれているCO₂溶接法をいかにして現場溶接に応用拡張するかの研究史であるともいえる。周知のとおりCO₂溶接は風によりアークのシールド性が損なわれること、ならびに深溶込みのためビード形状がいわゆる「なし形ビード」となり、高温われを発生しやすい欠点があるが、風に対しては局部防風装置ならびにCO₂ガス流量調整により、また高温われの問題は溶接条件を的確に選定すること、あるいはウィービング機構を導入することにより完全に解決された。また、現場における適応性に関しては3回の現場実験により問題点を漸次解決したが、それらの概況および結果について述べれば以下のとおりである。



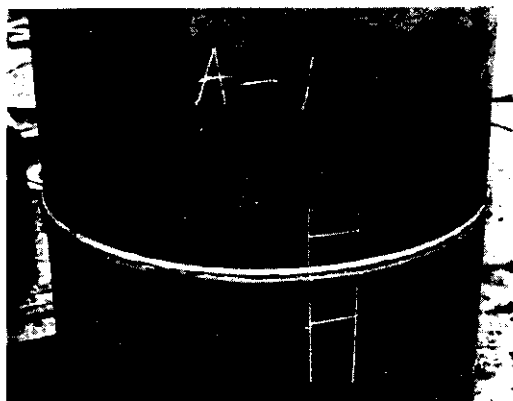
(a) Situation of welding



(b) X-ray test



(c) Root pass



(d) Final pass

Photo. 5 The 1st field welding test of "KH-P process"

3・4・1 第1次現場実験（当社鋼構造研究所 バーストピット基礎工事、昭和47年 10月）

本工法に応用した全自動溶接機は、水平すみ肉溶接用として(株)日立製作所が市販している磁輪駆動式台車「マグトレサー」をベースに改良したものであるが、幾多の室内走行実験より第1号機として **Photo. 5 (a)** が完成され、これを用いて当所バーストピット基礎工事において溶接施工実験を実施した。使用鋼管は S T K 41, 電縫鋼管 $508\phi \times 9.5t \times 15000l$, 杭数10本であったが、3本継ぎであるため計20継手を施工した。継手形状は「リバージョイント」4ヶ所、残りは別途開発中の「リバージョイント-N」とし、比較対照のため「KH-P工法・CO₂法」とノーガス半自動溶接法とを併用した。継手は当所で加工したため、加工管理が十分で建込みの隙目違いおよび肌すきとも軽微でいずれも1.5mm以下であった。**Table 5** に溶接条件を示し、**Photo. 5 (c), (d)** に溶接ビードを示すが、非常に美しいビードが得られた。溶接が完了した継手を **Photo. 5 (b)** に示す要領でX線透過試験したが、その結果は **Table 6** のとおりである。表から明らかなように「KH-P工法・CO₂法」では「リバージョイント」ならびに「リバージョイント-N」ともすべて3級以上で、そのうちほとんどが1～2級であったが、ノーガス半自動溶接ではビード継目個所に欠陥が集中するため、予想どおり J I S 規格判定4級の個所を生じ、「KH-P工法」にはとうていおよばないことがわかる。基礎杭のうち一部を堀削して

取出し、「KH-P工法」で施工した継手について引張り、曲げ、マクロ試験片を任意採取してその機械性能試験を行なったが、結果は**Photo. 6** に示

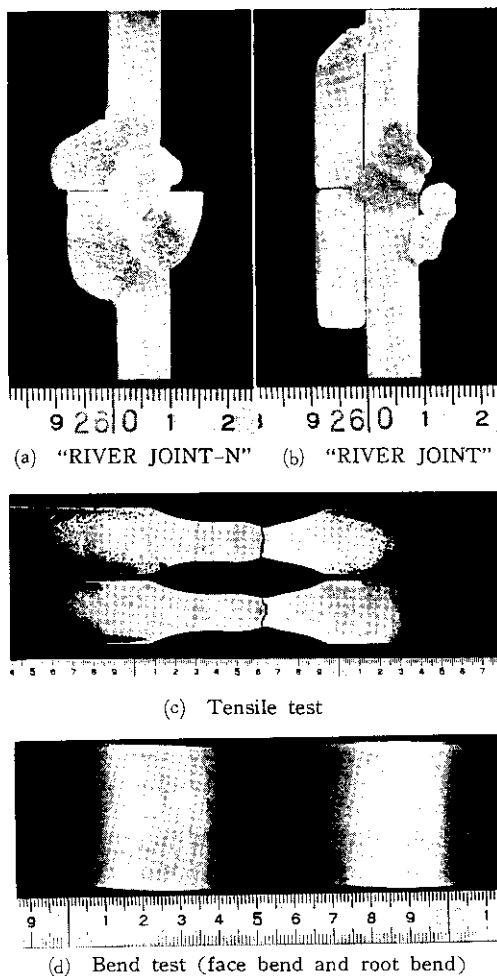


Photo. 6 The efficiency test of welding joint by "KH-P process"

Table 5 Welding condition of the second field test

Welding procedure	Wire for welding	Welding condition					
		Root pass			Final pass		
		Current (A)	Voltage (V)	Velocity (cm/min)	Current (A)	Voltage (V)	Velocity (cm/min)
"KH-P process CO ₂ method"	K C -50 1.6 ϕ	370~400	34~37	40~50	320~350	320~350	50~60
Non-gas arc welding	OW-56 A 3.2 ϕ	350~380	24~26	20~30	20~30	350~380	30~35

* Pipe.....E. R. W. $508\phi \times 9.5t$

すとおりの良好で各試験とも何ら問題はなかった。
また継手の残部から2mmVノッチ衝撃試験片を
取り、Table 7に示すような継手と溶接法の組合
せについてシャルピー試験を実施したが「KH-

P工法・CO₂法」によるものとノーガス半自動の
ものとは予想どおりはっきりその差異を示し、各
温度における値を比較すれば Fig. 8 のようにな
る。この結果からも本工法の優秀性が明らかであ

Table 6 Results of the X-ray penetration test

Pile and film number	Joint and welding procedure	Judgement (JIS standard)	Pile and film number	Joint and welding procedure	Judgement (JIS standard)
A-1-A	R J-N, CO ₂	1 grade	E-2-D	R J-N, CO ₂	1 grade
B	"	1	F-1-A	"	1
C	"	1	B	"	1
D	"	1	C	"	1
E	"	1	D	"	2
F	"	1	F-2-A	"	3
A-2-A	"	2	B	"	1
B	"	1	C	"	3
C	"	1	G-1-A	R J-N, Non-gas	1
D	"	1	B	"	3
E	"	1	C	"	1
F	"	1	D	"	2
B-1-A	R J, Non-gas	2	E	"	4
B	"	3	H-1-A	R J, CO ₂	2
B-2-A	"	4	B	"	1
B	"	3	H-2-A	"	1
C	"	4	B	"	1
D	"	2	C	"	2
E	"	1	D	"	1
C-1-A	R J-N, CO ₂	1	E	"	3
B	"	1	I-1-A	R J-N, CO ₂	1
C	"	1	B	"	1
D	"	1	C	"	1
C-2-A	"	1	D	"	1
B	"	1	E	"	1
C	"	1	F	"	1
D	"	1	I-2-A	R J-N, Non-gas	3
E	"	1	B	"	2
D-1-A	R J-N, Non-gas	2	K-2-A	R J-N, CO ₂	1
B	"	3	B	"	1
D-2-A	"	3	C	"	2
B	"	1	D	"	2
C	"	1	E	"	1
D	"	1	F	"	1
E-1-A	R J-N, CO ₂	1	Film.....SAKURA RR		
B	"	1	Penetrometer.....2 F		
C	"	1	Voltage and current.....195kV, 4 mA		
E-2-A	"	1	Time of exposure.....60sec		
B	"	1	"RJ".....RIVER JOINT		
C	"	1	"RJ-N".....New RIVER JOINT		

るが、溶接所要時間に関しても **Table 8** のように「KH-P工法・CO₂法」によるA～H杭は、ノーガス半自動溶接によるB、I杭に比して今回のように508φと小径杭であるにもかかわらず、5.6min程度時間が短縮されており、本工法が溶接能率向上に大きく寄与することが立証される。本実験より問題点として次の2点が挙げられた。

(i) トーチにウィービング機構が無いため、累層技術にやや高度のものを必要とする。

(ii) ガイドレールは電縫鋼管用のものほかに、スパイラルビードを回避できるスパイラル鋼管用のものを開発すべきである。

上記(i)については溶接ヘッド磁輪駆動用モーターに連動させたウィービング装置を開発し、

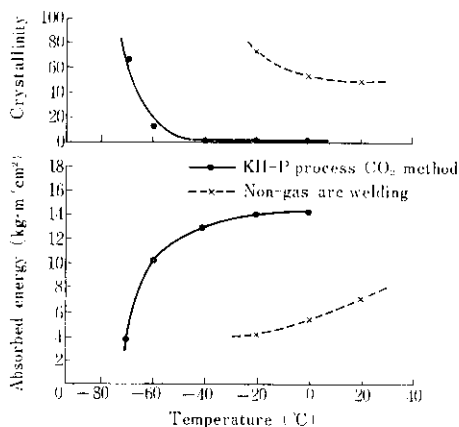


Fig. 8 Absorbed energy of the joint by "KH-P process CO₂ method"

Table 7 Results of impact test (5 × 8 mm half-size 2 mm V-notch Charpy impact test piece)

Test piece number	R J-N, "KH-P process CO ₂ method"		R J, "KH-P process CO ₂ method"		R J-N, non-gas arc welding		Temperature (°C)
	Absorbed energy (kg·m)	Impact value (kg·m/cm ²)	Absorbed energy (kg·m)	Impact value (kg·m/cm ²)	Absorbed energy (kg·m)	Impact value (kg·m/cm ²)	
1	5.67	14.2	4.16	10.4	2.16	5.4	0
2	6.75	16.9	4.25	10.6	2.24	5.6	
3	5.12	12.8	4.54	11.3	2.04	5.1	
Average	5.85	14.6	4.32	10.8	2.15	5.4	
4	5.67	14.2	4.30	10.7	2.58	6.4	-20
5	4.73	11.8	4.16	10.4	1.95	4.9	
6	5.02	12.6	4.44	11.1	1.67	4.2	
Average	5.14	12.9	4.30	10.7	2.07	5.2	

Table 8 Comparison of the required time in minute for welding (E.R.W. 50.8φ × 9.5 t)

	Pile number	Setting guide rail	Setting welding equipment	Root pass	Final pass	Equipment removal	Other	Total time
KH-P process CO ₂ method	A-1	1.03	2.00	2.92	2.48	1.67	—	10.10
	C-1	0.67	2.25	3.25	2.67	1.50	—	10.33
	F-1	1.17	2.05	3.32	2.67	1.83	—	11.03
	H-2	0.83	2.33	3.33	2.55	2.03	—	11.08
Non-gas arc welding	B-1	—	—	7.83	5.08	—	4.17 Slag removal	17.08
	I-2	—	—	7.20	4.88	—	3.83 Slag removal	15.92

(ii)に関しては前述のようにセグメント状分割方式のガイドレール (Photo. 2 参照) を考案して解決した。これらはつづく第2次現場実験でその性能が確かめられた。

3・4・2 第2次現場実験 (当社千葉製鉄所西工場 U.O.E. 岸壁基礎工事, 昭和48年6月)

本実験は杭打工事中最もシビアな条件となる海上打ちの現場溶接であり (Photo. 7 参照), 鋼管杭は STK41, スパイラル鋼管 $1016\phi \times 10.5t \times 40000l$ (2本継ぎ) であった。杭数は8本で, そのうち「KH-P工法・CO₂法」で5継手, 残り3継手を「KH-P工法・ノーガス法」で溶接施工した。本実験では前述したスパイラル鋼管用ガイドレール (セグメント状3分割, バネおよびレバー締付型) およびトーチウィービング機構を有し, CO₂法, ノーガス法互換方式の「KH-P2号機」を用いて施工した。作業環境および条件は次のような要因のため劣悪であった。

- (i) 始めて経験する海上作業である
- (ii) 開先が現場加工である
- (iii) 鋼管杭 (特に開先) の錆がひどい
- (iv) 管端の変形が大きく目違いがある

すなわち, (i)に関しては Photo. 7 からわかるように溶接作業足場がきわめて簡素で不安定狭隘なものであり, しかも杭打台船に連結しているため波浪により大きく動揺するし, オペレーターが

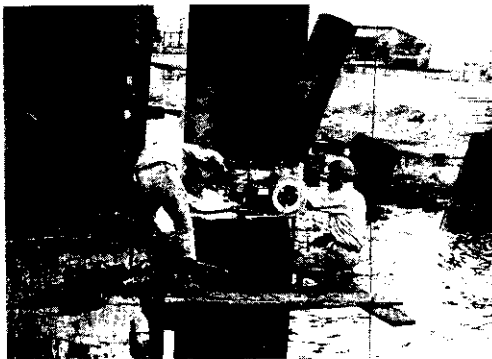


Photo. 7 The 2nd welding performance with "KH-P process" on construction of export wharf for U.O.E. pipes at Chiba Works

十分溶接作業に注意を払い得なかった。(ii)～(iv)は全自動溶接の条件に相反するものであり, 溶接施工にあたっては細心の注意を必要とした。以上のような悪条件にもかかわらず, 溶接ビードが多少たれ落ちを生じたほかはまずまずの仕上がりであった。新型ガイドレール, ウィービング機構とも順調に効力を発揮し, 特に後者は開先不整のはなはだしい今回のような溶接施工には, 累層技術の面で非常に有効であることが判明した。溶接条件ならびに溶接所要時間を表示すれば, Table 9 のとおりである。本実験では海上施工であったため風の影響も相当にあり, 改良点として局部防風装置を現状 (Fig. 3 に示すように角錐台状の観察窓はなく, 両側に開口部を有している) よりもさらに防風効果の高いものにする必要性が判明したほかは, 本実験に用いた様式で十分であることの確証が得られた。防風箱はさっそく Fig. 3 に示した形式に改良され, 防風効果に関して次のような実験を実施した。

3・4・3 防風箱の防風実験

風に対して開口断面を最小限にするという主旨から, 熔融池観察用開口部を Fig. 3 に示すように角錐台状とし, その防風性を確かめるため以下のような実験を行なった。すなわち, Fig. 9 に示すように, $800\phi \times 12.0t \times 2000l$ の鋼管杭にガイドレールおよび溶接ヘッドをセットし, 溶接ヘッド所定の位置に防風箱を取りつけた。なお, 溶接トーチは風速計測の障害となるためここでは取

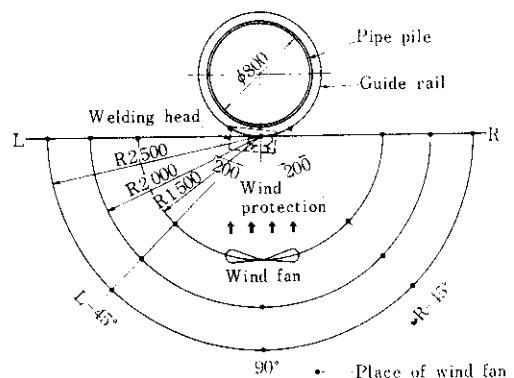


Fig. 9 Wind protection test

Table 9 Welding condition and required time for welding at the wharf construction site in Chiba Works (Spiral seam pipe 1 016 ϕ ×10.5 t)

Pile number	Welding procedure	Pass	Welding condition				Arc time (min)	Wind velocity (m/sec)	Max. misalignment (mm)
			Current (A)	Voltage (V)	Velocity (cm/min)	Pressure and discharge of CO ₂ (atm, l/min)			
1	KH-P CO ₂	1	380	36~38	34	3.5 60	9.33	3.5	+ 3.5
		2	"	"	31		10.23		
		3	300	32	38		6.43		
2	KH-P CO ₂	1	380	35	50	3.5 60	5.83	4.0	-11.0
		2	370	35	34		12.03		
		3	300	32	34		16.93		
3	KH-P Non-gas	1	350	27	—	—	—	4.5	+ 1.5
		2	220	25	—		—		
		3	280	25	—		—		
4	KH-P CO ₂	1	380	36	—	3.5 60	—	—	—
		2	380	36	—		—		
		3	300	32	—		—		
5	KH-P Non-gas	1	360	28	27	—	11.97	6.0	+ 5.0
		2	350	28	27		11.68		
		3	320	27	24		10.77		
6	KH-P CO ₂	1	360	35	35	3.5 60	8.95	3.2	- 3.0
		2	360	35	35		10.87		
		3	320	32	43		7.53		
7	KH-P Non-gas	1	360	27	29	—	10.98	2.2	+ 2.5
		2	350	27	29		11.45		
		3	330	27	34		9.53		
8	KH-P CO ₂	1	350	32	38	2.7 62	8.57	2.5	+ 3.5
		2	340	32	38		11.83		
		3	300	32	46		7.02		

り除いた状態とし、風源としては工業用扇風機を用いた。一般に溶接現場ではあらゆる方向から風が吹くことを考慮して図示のような風向、すなわち、防風箱左右両側（L、R）と防風箱に対し垂直方向（90°）とこれらのなす角の2等分線方向（L-45°、R-45°）の計5方向を選定した。ま

た、風源位置は防風箱よりそれぞれ 1 500、2 000 および 2 500mm とし、防風効果を調べるため、**Fig. 10** に示すように防風箱外に3測点（U、L、R₀）、防風箱内に1測点（I）を設け、風速計により種々の風源位置に対する風速を測定した。その結果は **Table 10** に示すとおりで、表より防風箱

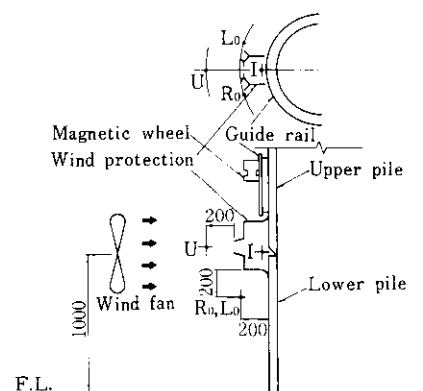


Fig. 10 Measuring points of wind velocity

内ではいずれの方向からの風であっても 1m/sec 以内に低減されており、同表(c)欄に示すように風速減少率を算定すれば最低80%まで風速を下げることが判明する。なお、参考までに風源距離を 2000mm としたときの防風箱内の風速分布を示せば Table 11 のとおりであり、溶融池にもっとも近い位置の風速は非常に低下していることがわかる。

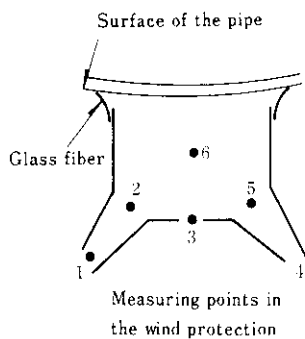
3.4.4 第3次現場実験(当社水島製鉄所第2分塊工場運突基礎工事, 昭和49年1月)

過去2回の現場実験を経過し、そのつど発生し

Table 10 Measured wind velocities in and out of the wind protection

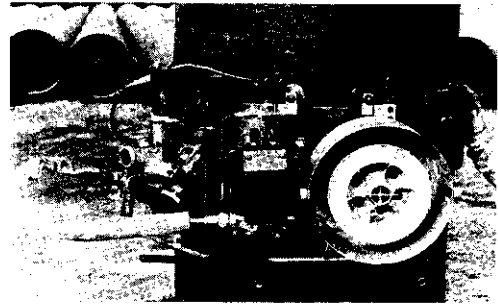
Direction of the wind	Distance from the wind source (m)	(a) Wind velocities out of the box (m/sec)				(b) Wind velocities at the point I in the box (m/sec)	(c) Decrease ratio $\frac{\text{max. (a)} - \text{(b)}}{\text{max. (a)}} \times 100$ (%)
		L ₀	R ₀	U	max.		
L	1.5	4.5	0.7	5.5	5.5	0.7	87
	2.0	4.2	0.7	5.0	5.0	0.4	92
	2.5	4.0	0.7	4.3	4.3	0.3	93
L-45°	1.5	1.5	4.0	6.0	6.0	0.4	93
	2.0	2.5	4.0	5.0	5.0	0.6	88
	2.5	1.4	2.5	3.5	3.5	0.5	94
90°	1.5	3.5	5.0	5.5	5.5	0.3	87
	2.0	3.5	3.5	4.0	4.0	0.5	93
	2.5	3.5	4.2	3.0	4.2	0.3	93
R-45°	1.5	4.5	1.5	2.5	4.5	0.8	82
	2.0	3.5	2.0	4.0	4.0	0.7	82
	2.5	4.2	2.3	3.0	4.2	0.7	83
R	1.5	2.5	4.5	5.0	5.0	0.5	90
	2.0	0.7	4.0	5.0	5.0	0.2	96
	2.5	1.2	3.5	5.0	5.0	0.2	96

Table 11 Wind velocities in the wind protection distance from wind source : 2.0m)

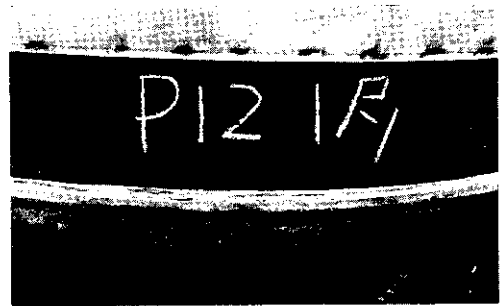


Direction of the wind	Wind velocity (m/sec)					
	1	2	3	4	5	6
L	2.5	0.6	1.0	0.9	0.7	0.5
L-45°	4.5	1.0	1.5	3.5	1.6	0.5
90°	3.0	1.8	3.0	2.2	1.2	0.7
R-45°	3.2	1.5	3.3	5.0	1.4	1.3
R	3.0	0.8	0.8	2.0	0.5	0.3

た問題点は逐次解決され「KH-P工法」はほぼ確立された。本実験はさらにその実績を踏むため、当社水島製鉄所構内第2分塊工場増築に伴う煙突基礎、ならびに建屋基礎工事現場で実施された。基礎杭はSTK41、スパイラル鋼管 $762\phi \times 7.9t \times 21000l$ であり、煙突基礎12本、建屋基礎4本の計16本(16継手)を「KH-P工法・CO₂ならびにノーガス法」にて施工した。継手はすべて「リバージョイント」であったが、開先は現場加工(手動ガス切り、グラインダー仕上げ)であることからその精度が懸念された。事実建込み終了後では最大4mmにもものぼる肌すきが随所に生じていたが、目違いはほとんど見受けられなかった。溶接状況ならびにビード外観を示せば、Photo. 8のとおりであり、きわめて美しいビードが得られた。また溶接条件および溶接所要時間を表示すれば、Table 12, 13のとおりである。表より明らかに溶接速度は50cm/minと非常に早く、「KH-P工法・CO₂法」では1継手施工に段取りから後始末を含めて平均17.1minで終了する。これに対し、ただ一例のみではあるが「KH-P工法・ノーガス法」では約2倍近くの時間を要しており、改めてCO₂法の高効率性が確認される。CO₂法では $762\phi \times 9.5t$ (45°レ型開先)でアークタイム9.5min 段取りおよび後始末に7.5minを要しているが、後者は鋼管杭が大口径となってもほぼ一定とみなすことができ、溶接速度50cm/minを考慮するとき、本工法が大口径になればそれだけ効力を増すであろうことが容易に推察される。



(a) Welding situation



(b) Root pass



(c) Final pass

Photo. 8 The 3rd construction site welding test at Mizushima Works

Table 12 Welding condition of the 3rd field test in Mizushima Works ($762\phi \times 7.9t$ pipe)

Pile number	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15	P 16
Welding procedure	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	Non-gas	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂
Current (A)	380	380	360	340	340	360	360	300	350	350	350	350	360	360	350	350
Voltage (V)	38	35	36	34	34	35	35	25	34	34	35	35	35	35	36	36
Velocity (cm/min)	1 pass	50	46	49	47	47	48	51	28	51	—	—	40	—	—	—
	2 pass	52	50	51	60	54	58	50	23	54	—	—	49	—	—	—

Table 13 Required time in minute for welding (762φ×7.9 t pipe)

Pile number	P 1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9
Welding procedure	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	CO ₂	Non-gas	CO ₂
Setting equipment	3.58	2.75	2.92	—	—	8.92	3.33	3.88	—
Arc time	1 pass	4.82	5.22	4.88	4.60	4.87	4.97	4.65	8.47
	2 pass	4.58	4.80	4.72	4.52	4.63	4.13	4.80	10.60
Loss time	1.60	2.03	1.87	—	—	2.25	0.73	*6.33	—
Equipment removal	1.40	1.60	1.48	—	—	1.30	1.20	2.65	—
Total time	15.98	16.40	15.87	—	—	21.57	14.72	31.93	—

* The time includes slag removal

4. 結 言

本工法は数多くの室内実験ならびに3回の現場実験を通し、鋭意努力の結果 CO₂ 溶接法の現場溶接適用化の諸問題を残らず解決し、全自動溶接法と併用してその最大の利点ともいべき鋼管杭溶接技術の平易簡素化と、溶接性能向上とを実現した点きわめて有意義である。将来、本工法が国内外の建設工事現場で広く活用されることが大いに期待されるが、最後に本工法の有する利点をまとめて列挙すれば次のとおりである。

- (1)継手性能がきわめてすぐれている
- (2)溶込みの深い継手が得られる
- (3)スラグ剝離も不要で、開先も最少断面積であるため作業性が良い
- (4)溶接装置が分離型であるのでセットが簡単である
- (5)台車走行およびアークが安定しているので確実な溶接作業ができる

なお、本工法における溶接機まわりの開発は㈱日立製作所溶接機部設計グループとの共同研究の成果であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田中ほか：鋼管杭の現場自動溶接工法、溶接技術、(1971) 9, 169～181
- 2) 木寺、鷹取：鋼管杭の現場継手と現場全自動溶接工法 —NKA工法の開発—、日本鋼管技報、(1972) 60, 61～70
- 3) 経済調査会：KH-P工法、積算資料、(1973) 8, 1～5
- 4) 坂部、高橋ほか：全自動鋼管杭溶接法 —KH-P工法—、建設機械、10 (1974), 66～76
- 5) 坪井ほか：鋼管杭用 CO₂ 全自動溶接について、溶接学会溶接法研究小委員会、(1972) 8月
- 6) 金子、高橋、原：溶接継手をもつ鋼管杭の曲げ圧縮挙動に関する研究、土木学会第28回年次学術講演会、(1973), 283～284
- 7) 高橋、金子、山崎：鋼管杭全自動溶接継手部の強度に関する研究、土木学会第28回年次学術講演会、(1973), 281～282