



鞍形管台溶接継手における超音波探傷試験のき裂深さ測定誤差

Ultrasonic Depth-sizing Errors of Crack-like Defects in Saddle-shaped Weld Joints

電力中央研究所	福富 広幸	Hiroyuki FUKUTOMI	Non-Member
電力中央研究所	林 山	Shan LIN	Non-Member
電力中央研究所	緒方 隆志	Takashi OGATA	Non-Member

In order to determine crack depth in primarily loop recirculation (PLR) piping of boiling water reactors, ultrasonic angle beam testing using time of flight measurement of the diffracted signal from the crack tip, is employed. There are some power stations in Japan having saddle-shaped weld joints at branch connections in PLR piping. If the angle beam testing is applied without considering curvature of saddle-shaped weld joints, unlike weld joints of straight piping, it can be predicted that determined depth by the typical technique mentioned above contains a geometrical error due to the curvature. This issue has never been discussed in welds of branch connections. This paper deals with this issue with a mockup and phased array inspection system. As a result, the geometrical error is negligibly small in comparison to underlying depth-sizing errors of stress corrosion cracks in authentic stainless steel welds.

Keywords: Boiled Water Reactors, Primarily Loop Recirculation Piping, Saddle-shaped Welds, Ultrasonic Depth-sizing

1. 緒言

オーステナイト系ステンレス鋼配管突合せ溶接継手のき裂深さサイジング技量に関して、(社)日本非破壊検査協会規格 NDIS0603-2005「超音波探傷試験システムの性能実証における技術者の資格及び認証」附属書(規定)「軽水型原子力発電所用機器に対する PD 資格試験」(以下、NDIS0603 と記す)が制定され、平成 18 年 3 月に第 1 回目の認証試験が開始され、平成 20 年 4 月現在で 22 名の PD 資格者が誕生している。この種の規格は米国では既に種々の部位に対して展開されており[1]、国内では沸騰水型軽水炉発電プラントの再循環系 (Primary Loop Recirculation, PLR) 配管の継手部に生じた応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC) が対象となっている[2,3]。PLR 配管の溶接継手には、配管と配管或いは配管と弁やポンプのような突合せ溶接継手のほかに、配管分岐部では鞍形の管台が突合せ溶接継手と同様な開先で溶接されている継手があり、これを鞍形管台溶接継手と称している。この鞍形管台溶接継手の溶接線に平行な SCC が生じた場合、超音波探傷試験による深さサイジングにおいて、管台が溶接されている主管外面の探傷方位の曲率に起因して幾何学

的誤差が生じることが予想される。

本研究では、鞍形管台溶接継手の溶接線に沿って生じた SCC を想定した EDM スリットを有する試験体を製作し、スリットの深さサイジングを行い、測定誤差の評価および分析を行った。なお、深さサイジングは超音波フェーズドアレイ探傷装置を用いた縦波斜角探傷法で実施した。

2. 幾何学的誤差

鞍形管台溶接継手の SCC の開口部エコーと端部エコーのビーム路程と屈折角を用いて、計算で深さを求める方法として次の A、B および C の 3 方式が考えられる。

A 方式：式(1)に示すようにビーム路程 W_1 、 W_2 および屈折角 θ を用いる一般的な方法を示す。

$$D_A = (W_1 - W_2) \cdot \cos \theta \quad (1)$$

この方式は、配管の曲率がビーム路程に与える影響を考慮していないため、図 1 に示す各探傷方位で幾何学的誤差が変化する。JIS Z 3060 附属書 6「ノズル継手溶接部の探傷方法」[4]には、補正曲線を用い肉厚対外径比およびビーム路程を修正し、式(1)よりも複雑な計算式により深さを求める方法が記載されている。この方法は深さを求める過程が煩雑なため、本研究では検討対象外とする。例えば、式(1)により求めた測定深さは

連絡先: 福富広幸、〒240-0196 神奈川県横須賀市長坂 2-6-1、材料科学研究所 火力材料領域、
E-mail: fukutomi@criepi.denken.or.jp

0 および 180 度方位では幾何学的誤差は生じないが、それ以外の方位、例えば、図 2 に示す 90 および 270 度方位では最も誤差が大きくなり、曲率の影響により屈折角も設定値と異なる。また、これらの影響は配管径が小さくなるに従って大きくなる。

B 方式：屈折角の代わりに板厚 T を用いる同時法[5]により式(2)に示すようにき裂深さを求めることができる。

$$D_B = T - (W_2^2 - W_1^2 + T^2)^{1/2} \quad (2)$$

C 方式：超音波フェーズドアレイ探傷装置を用い、セクター画像から図 2 に示すように 2 つの屈折角を用いて式(3)により SCC 深さを求めることができる。

$$D_C = W_3 \cdot \cos \theta_3 - W_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (3)$$

B および C 方式において A 方式と同様に配管の曲率により幾何学的誤差が生じる。

400A (外径 425.5mm、厚さ 31mm) と 600A (外径 609.6mm、厚さ 30.9mm) の配管の 90 度方位に深さ 5mm および 10mm のスリットを仮定し、前述の A、B および C の 3 方式で CAD データから求めた深さの誤差を表 1 に示す。ここでは、探触子の屈折角を 45 度とした。同表から、幾何学的誤差は 400A より 600A の方が小さく、また、3 つの方式の中で C 方式が最も小さく、A 方式が最も大きいことが判る。A 方式において幾何学的誤差の影響を低減するためには、CAD などを用いて作図し、深さを求めることが考えられる。次章では、SCC を模したスリットを有する試験体を用い、幾何学

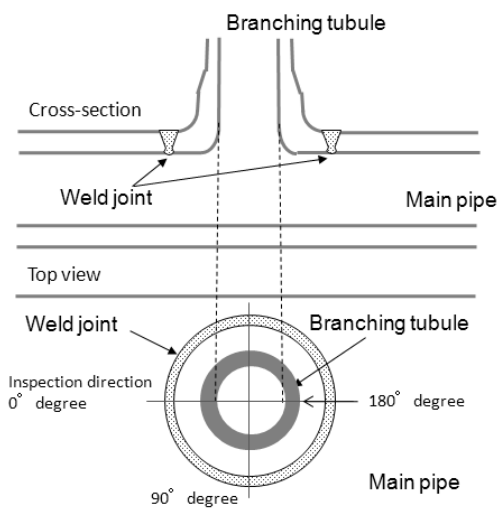


Fig. 1 Inspection direction on saddle-shaped weld

的誤差を調査することとする。

3. 深さサイジング精度の評価

3.1 試験体の製作

鞍形管台溶接継手における SCC の深さサイジングにおいて幾何学的誤差を調査するために、鞍形管台溶接継手に相当する部位の異なる探傷方位にスリットを有する瓦状試験体を製作した。本試験体の仕様を以下に示す。なお、材料や表面状態に起因する超音波の減衰は幾何学的誤差に影響しないことから、オーステナイト系ステンレス鋼の代わりに炭素鋼を用いることとした。

炭素鋼製配管 瓦状ブロック (材質: STPT370、厚み 40.5mm、外径 406.4mm)

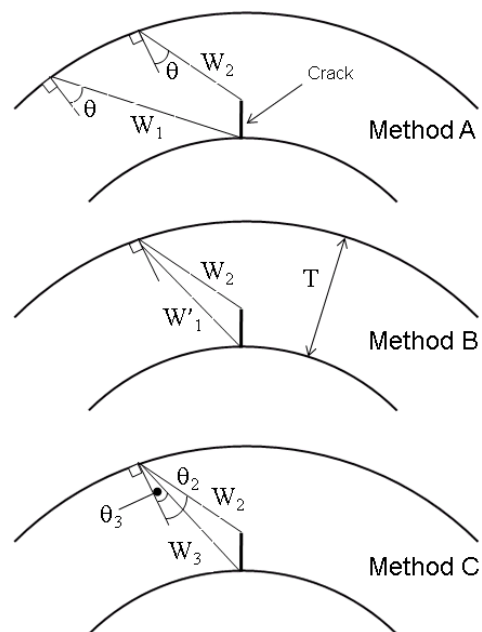


Fig. 2 Refracted angles and beam path lengths used in depth-sizing

Table 1 Determined depth errors in 90° direction estimated from CAD data

Pipe diameter	Slit depth (mm)	Geometrical error (mm)		
		Method A	Method B	Method C
400A	5	+1.10	-0.46	-0.08
	10	+1.94	-0.67	-0.07
600A	5	+0.55	-0.29	-0.06
	10	+1.13	-0.42	-0.02

縦波音速：6,028m/s

配管内面に EDM スリット（電極幅:0.3mm）を、内面に対して直角方向に付与

寸法①：深さ 10mm，長さ 20mm

付与位置：0、30、45、60、90°

寸法②：深さ 5mm，長さ 20mm

付与位置：120、135、150°

図 3 に試験体の概要を示す。また、EDM スリットの实测値を表 2 に示す。なお、実機の枝管の軸に相当する瓦状試験体の中心位置に探触子位置の計測用として直径 10mm の穴を設けた。

3.2 探傷方法

超音波フェーズドアレイ探傷装置を用い、縦波斜角探傷試験を実施した。使用した探傷装置は Zetec 社製 Omnican MX であり、ポリスチレン製縦波用シュー（STB 屈折角 45 度）とともに公称中心周波数 5MHz の 16ch 探触子を用いた。探触子の振動子寸法は 10×0.5mm であり、ピッチは 0.7mm である。探傷時の電子走査は 16 個の振動子を用いたセクターキャンである。

る。セクターキャンは 0 から 60 まで 1 度毎に設定した。機械走査はデータ取得間隔を 0.5mm とし、MTL 社製のリニアスケールエンコーダを用いて図 4 に示すように各方位において手動によりラインスキャンを行った。Y 距離は瓦状試験体の中心の穴を基準として測定した。接触媒質にはソニコートを使用した。

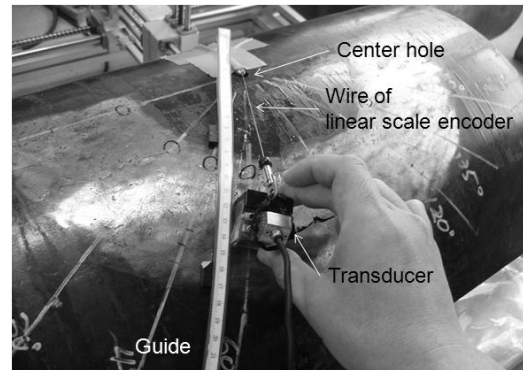


Fig. 4 One line scan by hand on mockup surface

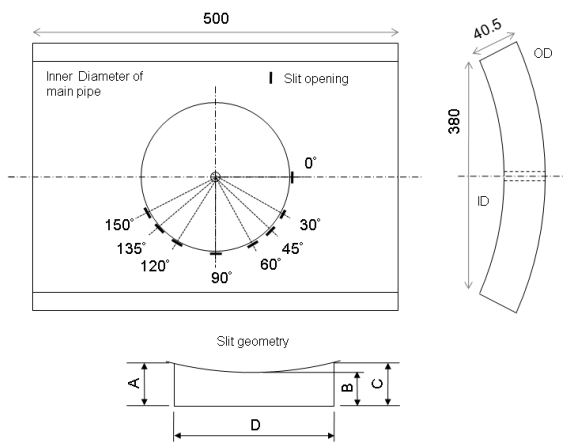


Fig. 3 Specifications of mockup

Table 2 Measured dimensions of slits

Dimensions	A	B	C	D	Slit width
Direction					
0°	10.11	9.78	10.09	20.1	0.41
30°	9.96	9.86	10.11	20.1	0.41
45°	10.18	10.00	10.07	20.1	0.41
60°	10.08	10.01	10.06	20.1	0.43
90°	10.09	10.05	10.08	20.1	0.40
120°	5.09	5.00	5.02	20.1	0.39
135°	5.00	4.96	5.07	20.1	0.39
150°	5.07	4.98	5.07	20.1	0.38

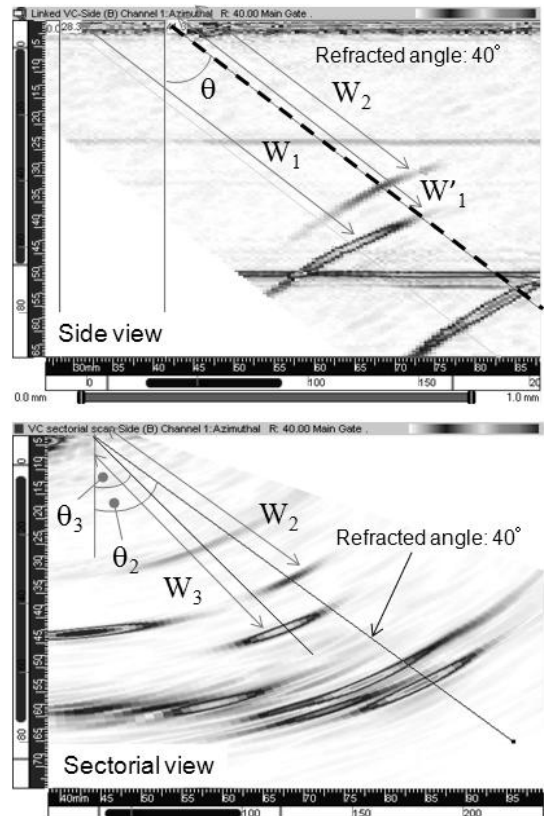


Fig. 5 Example of side and sectorial views in 90° direction

3.3 深さサイジング

A、B および C の各方式によりスリット深さを求めた。90 度方位の探傷データ例を図 5 に示す。同図から開口部エコーは端部エコーが最大となる探触子位置において A スコープ波形（破線上のデータ）上で読み取りにくくなることが判る。このため、B 方式を用いるのであれば、広い指向角の探触子を用いる必要がある。

A 方式では屈折角 40 度でビーム路程を測定した。この角度を選んだ理由は屈折角 45 度では開口部エコーとシュー内の多重反射により定常的に現れるエコーが重畳しており正確にビーム路程を読み取れなかったためである。B 方式では屈折角 40 度で端部エコーが最大となる探触子位置で開口部エコーのビーム路程を求めた。C 方式では屈折角 40 度で端部エコーが最大となる探触子位置で屈折角を変化させ開口部エコーが最大となる屈折角とビーム路程を測定した。3 つの方式によ

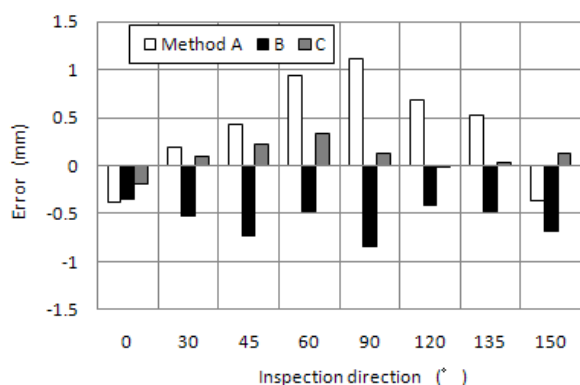


Fig. 6 Difference between measured and actual depths in method A, B and C

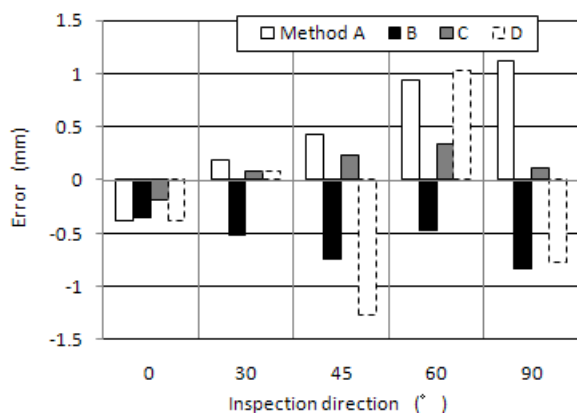


Fig. 7 Difference between measured and maximum depths in method A, B, C and D

る深さサイジング結果と最大スリット深さ（実測値）の差異を図 6 に示す。表 1 と同様に差異は C 方式が最も小さくなる結果が得られた。よって、超音波フェーズドアレイ探傷装置を用いた場合には、幾何学的誤差の影響が少ない C 方式で深さサイジングするのが望ましい。また、従来の斜角探触子を用いる場合には、前述の計算で深さを求める 3 つの方式ではなく、作図により深さを求める方法（ここでは D 方式と記す）を用いる必要がある。以下、この D 方式について検討する。

0 および 180 度方位以外では探触子の接触の仕方と実際の屈折角が校正時と異なることが予想される。そこで、ビーム路程およびスリット深さを正として作図から得られたスリットの開口部および端部に対する屈折角を表 3 に示す。同表から設定した屈折角と各探傷方位における開口部および端部に対する屈折角が異なることが判る。次に、0 度から 90 度方位において、Y 距離およびビーム路程を正として屈折角 40 度でスリットの深さを評価した。評価された深さおよび測定と

Table 3 Refracted angles estimated from CAD data

Direction (°)	Refracted angle (°)	
	Corner	Tip
0	41.3	41.8
30	39.1	38.2
45	38.9	37.4
60	36.0	36.9
90	37.7	38.1
120	39.9	38.3
135	36.7	35.9
150	38.7	39.1

Table 4 Slit depths estimated from CAD data

Direction (°)	Estimated depth (mm)	Error (mm)
0	9.7	-0.39
30	10.2	0.09
45	8.8	-1.27
60	11.1	1.04
90	9.3	-0.78

評価値の差異を表4に、スリット深さ（実測値）との差異をA、BおよびC方式と比較して図7に示す。表4および図7は十分な精度でスリット深さを求めることができることを示しており、D方式も有効な方法であると言える。ただし、この方式では、屈折角、探傷方位およびY距離は誤差要因となるため、探傷方位によっては屈折角が校正値と異なる可能性があることを配慮し、探傷方位とY距離を正確に測定することが必要となる。

本研究では、4つの方式についてスリットの深さサイジング誤差について分析した。深さを計算する場合、C方式が最も誤差が少なかった。一方、D方式においても十分な精度で深さを求めることができることを確認した。ただし、鞍形管台溶接継手では正確な屈折角、探傷方位およびY距離の測定を要求するD方式に比べ、A、BおよびC方式は簡便性に優れており、さらに精度面からC方式が最も優れていることが明らかになった。今回は配管内面に垂直に付与したスリットを用いたが、SCCが内面に対して斜めに成長しているような場合[6]や、枝管側に発生したSCCに対して溶接金属越しに探傷した場合には、これらが深さサイジング精度に与える影響を確認する必要がある。

4. 結言

本研究では鞍形管台溶接継手の溶接線に沿って生じたSCCを想定したEDMスリットを有する試験体を用いて深さサイジングを行い、測定誤差の評価及び分析を行った。なお、深さサイジングは超音波フェーズドアレイ探傷装置を用いた縦波斜角探傷法で実施した。得られた知見は以下の通りである。

(1)CADデータからの評価では、端部エコー法および同時法、ならびにセクター画像からの算出方式のうち、セクター画像を用いる方式が最も幾何学的誤差の影響が少ないことが明らかになった。

(2)作図による方式も十分な精度でスリット深さを求めることができる。ただし、同方式では、屈折角、探傷方位およびY距離は誤差要因となるため、探傷方位によっては屈折角の設定値と異なる可能性があることを配慮し、探傷方位とY距離を正確に測定することが必要となる。

(3)正確な屈折角、探傷方位およびY距離を要求する作図による方式に比べ、3つの計算方式は簡便性に優れており、さらに精度の点からセクター画像を用いる方式が最も優れている。

今後は、管厚方向に対してSCCが傾斜して進展した場合や、溶接金属を跨いだ探傷の場合における深さサイジング誤差を明らかにする必要がある。現状、本研究で対象としたPLR配管には、主管径が400A以下の鞍形管台溶接継手はないが、深さサイジングを必要とする小径配管の鞍形管台溶接継手の場合は、幾何学的誤差の影響の評価する必要がある。

参考文献

- [1] ASME, Boiler and Pressure Vessel Code Section XI, Appendix VIII, “Performance Demonstration for Ultrasonic Examination Systems”
- [2] 山口篤憲、“PD制度の動向について”、“保全学、Vol.4, No.1、2005、pp.8-12
- [3] 笹原利彦、“超音波探傷技術の認証試験（PD）”、“検査技術、Vol.10, No.4、2005、pp.29-34
- [4] JISハンドブック、非破壊検査、pp.639-642、2003
- [5] 高橋雅和、“超音波斜角探傷におけるスリットの高さ、角度の測定に関する実験的検討”、非破壊検査、Vol.40、No.11、1991、pp.717-724
- [6] 原子力安全基盤機構成果報告書、平成18年度低炭素ステンレス鋼の非破壊検査技術実証に関する事業報告書 [総括版]、2007/4、pp.142-181
(平成20年8月6日)