

ショッピングセンター車路スロープの疲労割れ—き裂深さの測定など

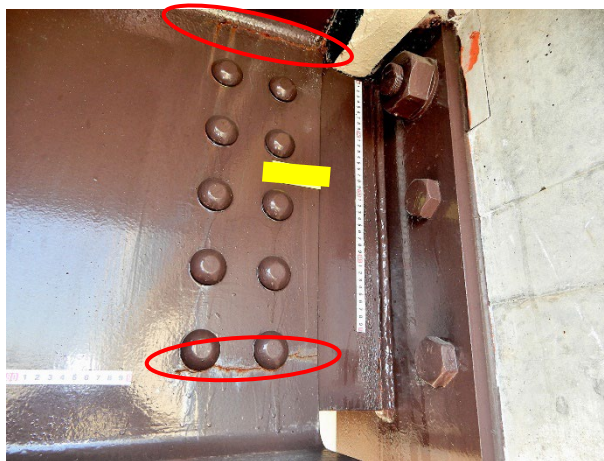
名古屋営業所

近藤 浩

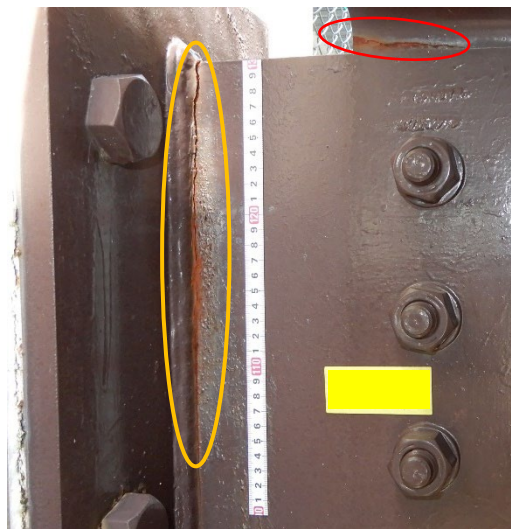
キーワード き裂深さ、磁粉探傷、疲労、車路、超音波探傷、端部エコー法、二振動子、表面SH波

1. 概要

築25年のPC造ショッピングセンターの3F、RF駐車場への車路スロープを支持する鉄骨にき裂が発生した。当初、き裂は「大梁 Web のフィレット部及びボルト穴付近」【写真1】だけだと見られていたが、磁粉探傷試験により「ガセットプレート取り付け隅肉溶接部止端部」【写真2】にもき裂が発生し、この車路が極めて危険な状態だということが判明した。このき裂深さを「二振動子斜角探触子」を用いた「端部エコー法」で測定、またALCにより隠蔽されている同溶接部は「表面SH波」を用い、き裂の発生を確認する事が出来たので報告する。



【写真1】
大梁 Web のき裂
上側はフィレット部
下側はボルト穴を繋ぐ形状



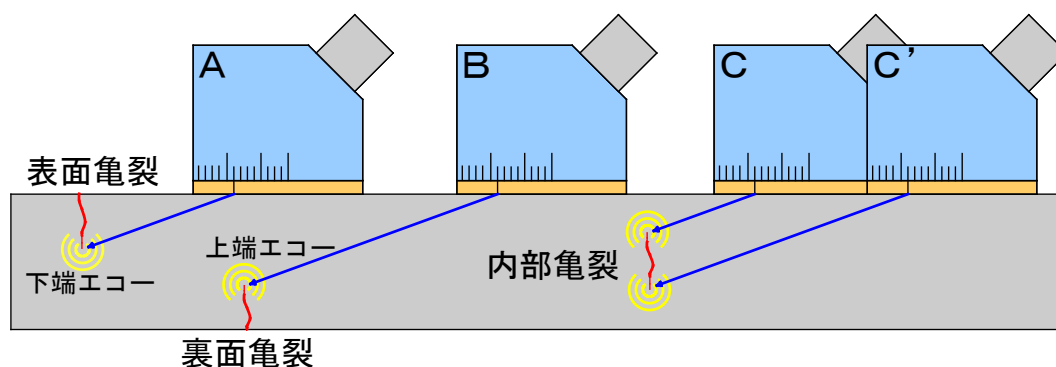
【写真2】
ガセットプレート隅肉溶接部止端部
き裂に雨水が浸入し発錆している

○部分はフィレットのき裂、発錆している

2. き裂深さの測定

2.1 端部エコー法とは

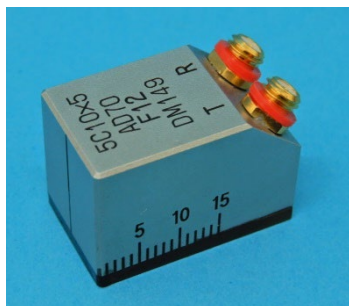
端部エコーとは、き裂の上端部または下端部からの回折波（諸説あり）によって得られるエコー。き裂深さ（高さ）は、【図 1】Aでは読み取った（下端エコー深さ）＝（き裂高さ）、Bでは（母材厚さ）－（上端エコー深さ）、Cでは（下端エコー深さ）－（上端エコー深さ）である。一般的には下端エコーが明瞭で、上端エコーは捉えにくい。



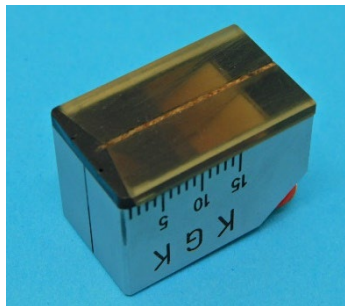
【図 1】

2.2 使用探触子、周波数、屈折角

使用探触子は 5C10×5 AD70 F12 （5MHz 二振動子 70° 交軸深さ 12 mm）



【写真 3】



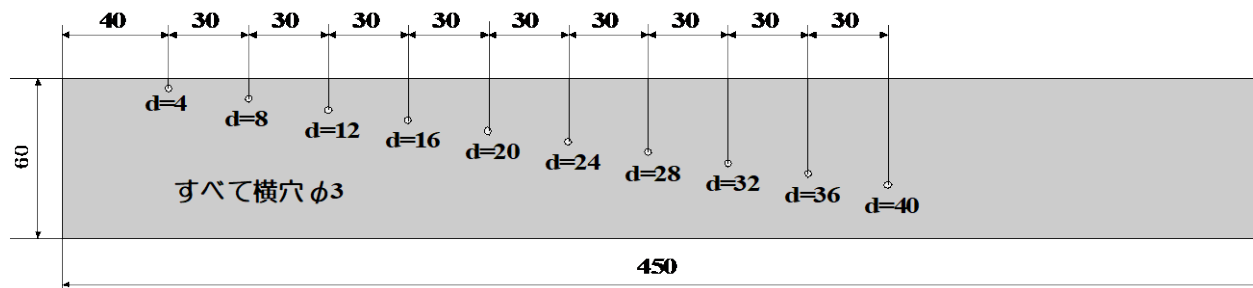
【写真 4】

JIS Z 3060 : 2015「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」付属書 8（参考）「きず指示高さの測定方法」（以下「JIS の付属書」と云う）では「一振動子斜角探触子、一振動子集束斜角探触子、二振動子斜角探触子」のいずれかとする」と書いてあるがビーム路程 10 mm以下を読み取るには、不感帯が極めて少ない二振動子の方が一振動子より優れている。 また、数十年前おこなった液化アンモニアタンクの応力腐食割れの深さ測定では AD70 が AD45 より端部エコーが明瞭だった記憶があり、特に鉄骨では余盛があるため接近限界が存在するので 70° を選択せざるを得ない。 周波数は比較したことは無いが、ビーム路程や材質を考えれば 2MHz を選択する理由はないと思われるが、浅いき裂では 7～10MHz が有効かもしれない。

2.3 機器の調整

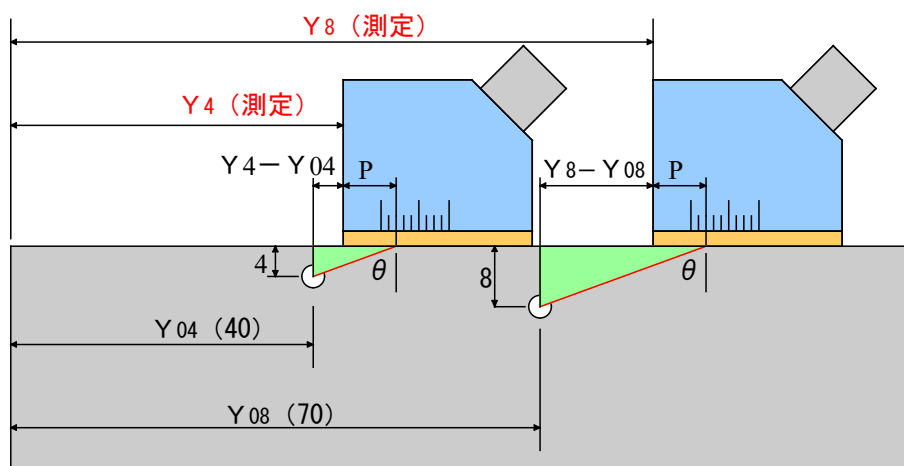
入射点・屈折角

入射点、屈折角の測定には対比試験片「RB-SDH」を使用し、予想されるき裂深さを挟む2つの深さの横穴を探傷し、計算で求める。



【図 2】

深さ 5 mm 程度のき裂を測定する場合、横穴深さ 4 mm と 8 mm（以下 d4、d8 と云う）を探傷し調整する。



【図 3】

それぞれの横穴を探傷し、エコーのピークを捉え対比試験片の角～探触子前面までの距離 Y4、Y8 を測定する。 Y4=43.5 mm、Y8=84.5 mm の場合【図 3】の入射点、横穴中心、横穴表面の直角三角形から

$$(\text{深さ 8 mm の横穴を探傷}) \quad 8 \tan \theta = 14.5 + P \quad \cdots \cdots \textcircled{1}$$

$$(\text{深さ 4 mm の横穴を探傷}) \quad 4 \tan \theta = 3.5 + P \quad \cdots \cdots \textcircled{2}$$

$$\textcircled{1} - \textcircled{2} \quad \text{より} \quad 4 \tan \theta = 11.0$$

$$\tan \theta = 2.75 \rightarrow \text{屈折角} \quad \theta = 70.0^\circ$$

$$\text{入射点} \quad P = 7.5 \text{ mm}$$

簡単な連立方程式を解いて、入射点 P、屈折角 θ を求めることが出来る。

測定範囲

測定範囲は前ページで求めた θ と各横穴の深さ d_n から、各横穴までのビーム路程を計算し、それに合致するように調整する。あらかじめ【表 1】のように一覧表を作っておくとよい。

$$w_4 = \frac{d_4}{\cos \theta} - 1.5$$

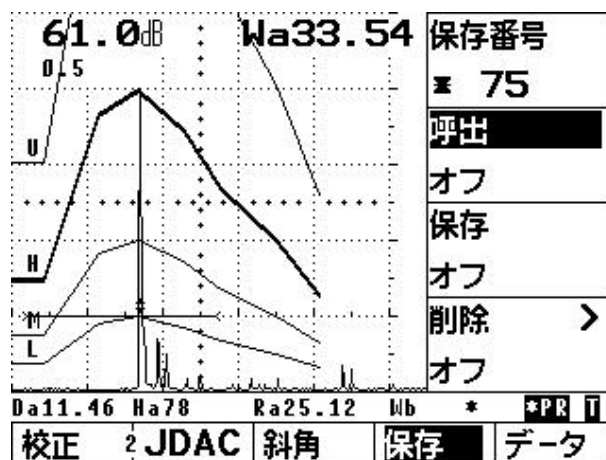
$$w_8 = \frac{d_8}{\cos \theta} - 1.5$$

RB-SDH 各穴のビーム路程 W										
横穴 深さ	屈折角 θ									
	69.5	69.6	69.7	69.8	69.9	70.0	70.1	70.2	70.3	70.4
4	9.9	10.0	10.0	10.1	10.1	10.2	10.3	10.3	10.4	10.4
8	21.3	21.5	21.6	21.7	21.8	21.9	22.0	22.1	22.2	22.3
12	32.8	32.9	33.1	33.3	33.4	33.6	33.8	33.9	34.1	34.3
16	44.2	44.4	44.6	44.8	45.1	45.3	45.5	45.7	46.0	46.2
20	55.6	55.9	56.1	56.4	56.7	57.0	57.3	57.5	57.8	58.1
24	67.0	67.4	67.7	68.0	68.3	68.7	69.0	69.4	69.7	70.0
28	78.5	78.8	79.2	79.6	80.0	80.4	80.8	81.2	81.6	82.0
32	89.9	90.3	90.7	91.2	91.6	92.1	92.5	93.0	93.4	93.9
36	101.3	101.8	102.3	102.8	103.3	103.8	104.3	104.8	105.3	105.8
40	112.7	113.3	113.8	114.3	114.9	115.5	116.0	116.6	117.2	117.7

【表 1】

DAC

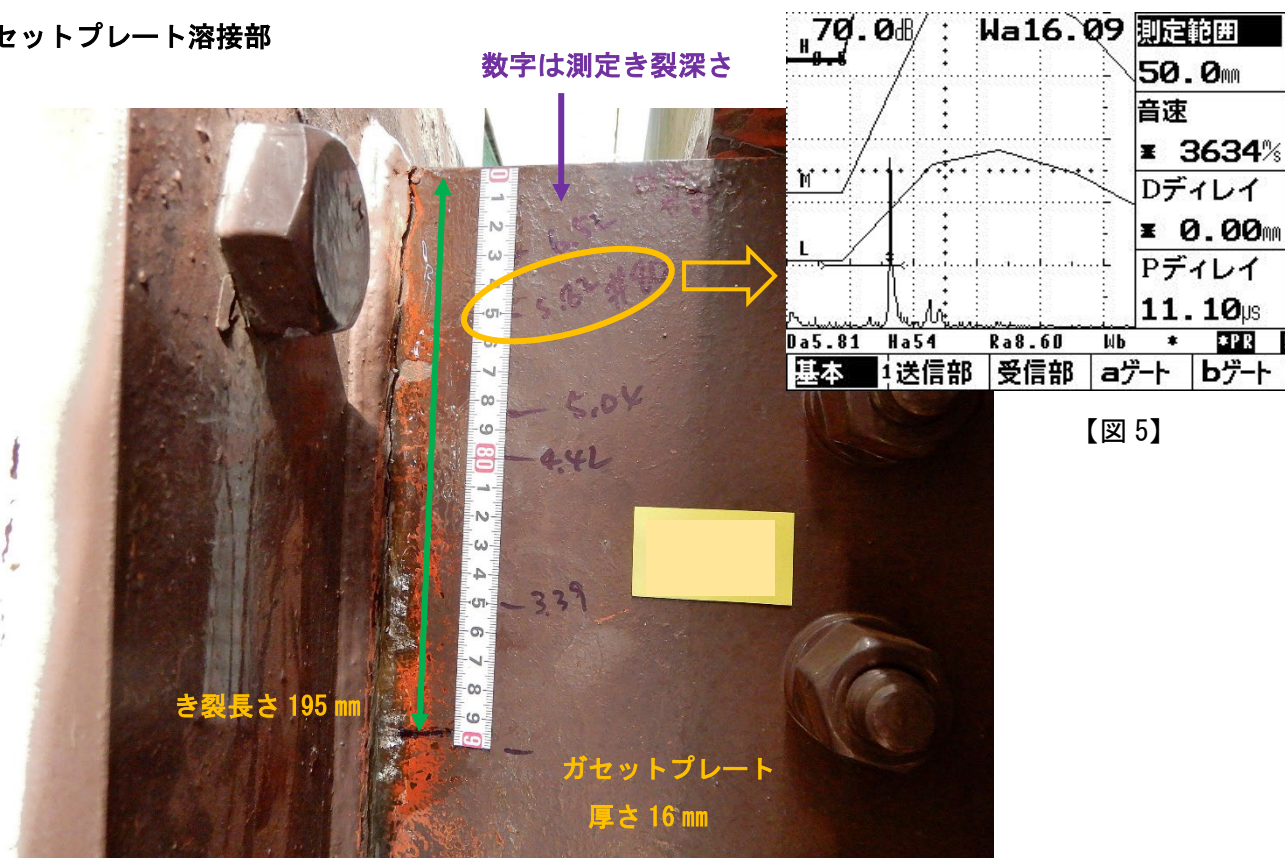
「RB-SDH」で描いたDACは見慣れない形をしている（測定範囲 100 mm）。ピークがビーム路程 35 mm 付近、 $\theta = 70^\circ$ では深さ 12 mm にある。深さ 4 mm の横穴と 12 mm の横穴では感度が 6 dB 以上違う。【図 4】で分かるように、この探傷感度でビーム路程 35 mm 以内にノイズエコーが存在しない。



【図 4】

2.4 き裂深さの測定

ガセットプレート溶接部



【図 5】

【写真 5】

【写真 5】は上端から長さ 195 mmのき裂の測定結果。探傷波形は深さ 5.82 mm（記録波形では 5.81 mm）のもので、前後走査して捉えたピーク。き裂先端の端部エコーが明瞭に観察できる。この面では深さ 3.39 mmより浅いき裂は接近限界のため測定出来なかったが、裏面では深さ 2.3 mmのき裂を捉えていた。き裂の先端が溶接止端部の直下にある場合、探触子の入射点 8 mm、屈折角 $\theta = 70$ では、深さ 2.9 mmのき裂先端を捉えるが、実際にはピークを捉える為の前後走査が必要なので、深さ 3 mm～4 mm程度が検出の限界だと思われる。但し、き裂の先端が探触子側へ寄っている場合はより浅いき裂の先端を捉えることが出来、き裂先端が溶接部側にある場合はより深いき裂しか捉えることが出来ない。

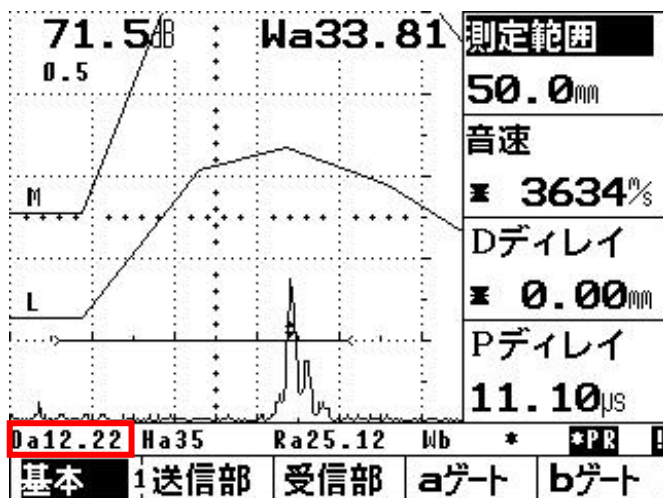
ガセットプレート小口



【写真 6】
ガセットプレート小口 危険なき裂



【写真 7】
小口から探傷する事が出来た



【図 6】
き裂深さ 12.2 mm !

3. ALC隠蔽部における き裂存在の確認

ガセットプレート溶接部がALCに隠れている部分では、表面SH波によってき裂の有無を確認した。

3.1 露出部での確認



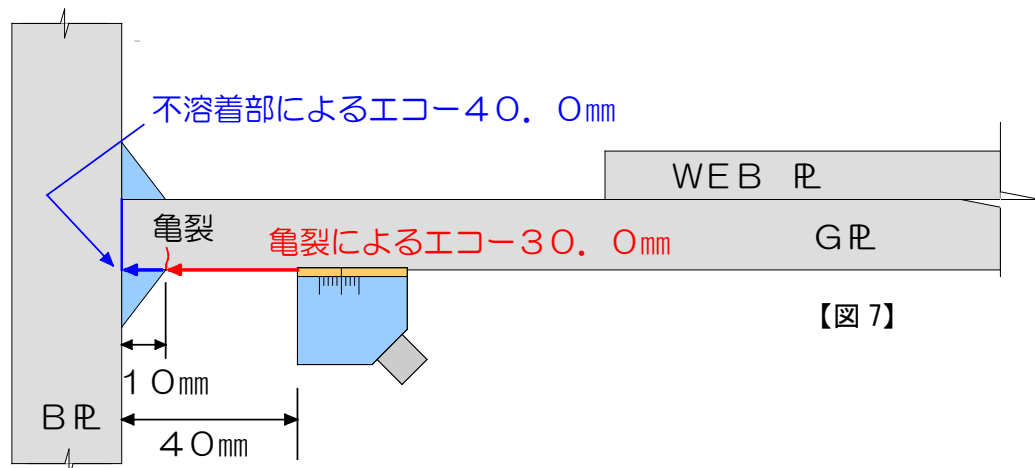
【写真 9】

磁粉探傷によりき裂が確認されている部分で試行

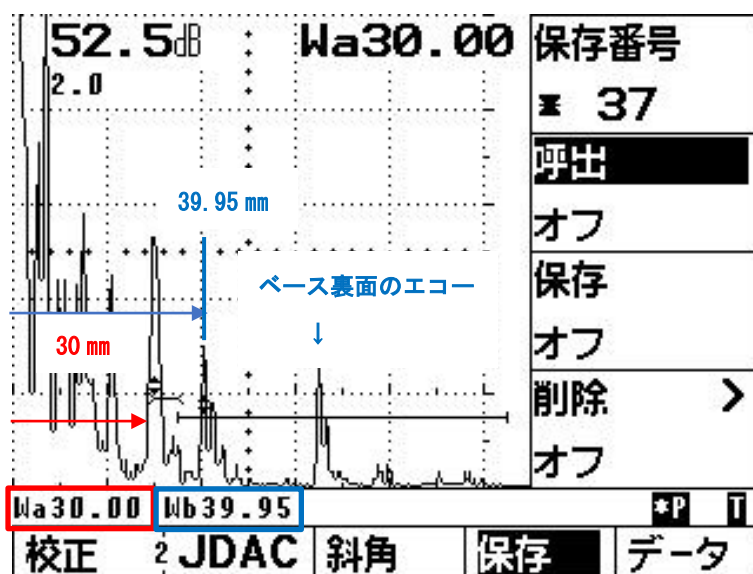
使用探触子 2Z10×5HA90

止端部から距離 30 mmに設置

(ベースプレートから距離 40 mm)



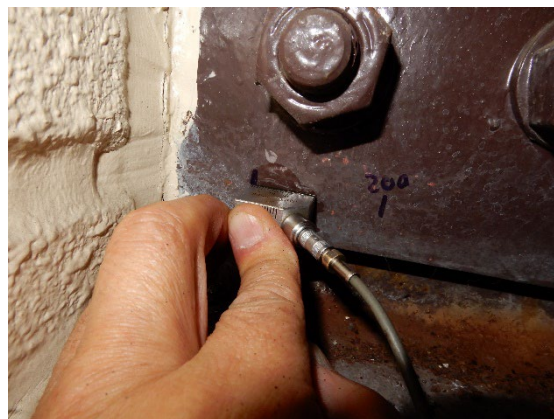
【図 7】



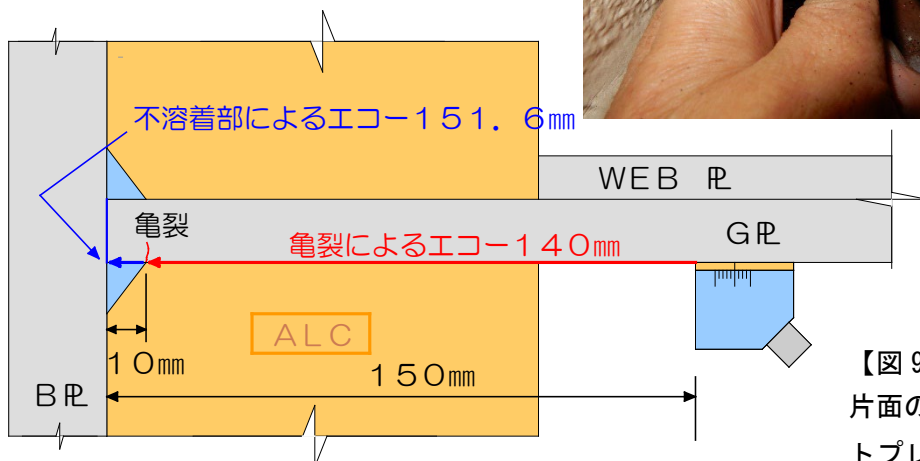
【図 8】 止端部から距離 30 mmに探触子を配置したところ、止端部のき裂、隅肉溶接部の不溶着部（脚長 10 mm）、ベースプレート（厚さ 25 mm）の裏面の順にエコーが出現した。（測定範囲 100 mm）

3.2 隠蔽部での確認

SH波探傷は安定性が悪いが、ALCによる隠蔽部においてガセットプレート全線にき裂が発生していることを確認出来た。

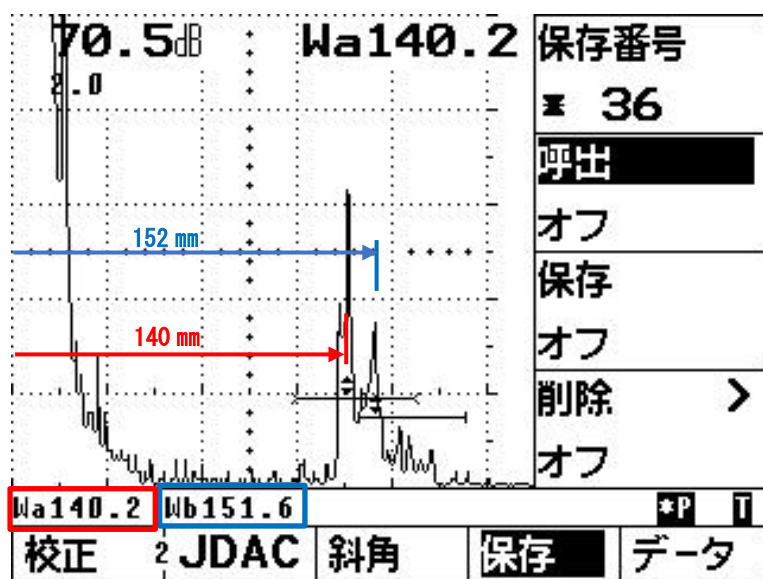


【写真 10】
ベースから距離 150 mm
で探傷



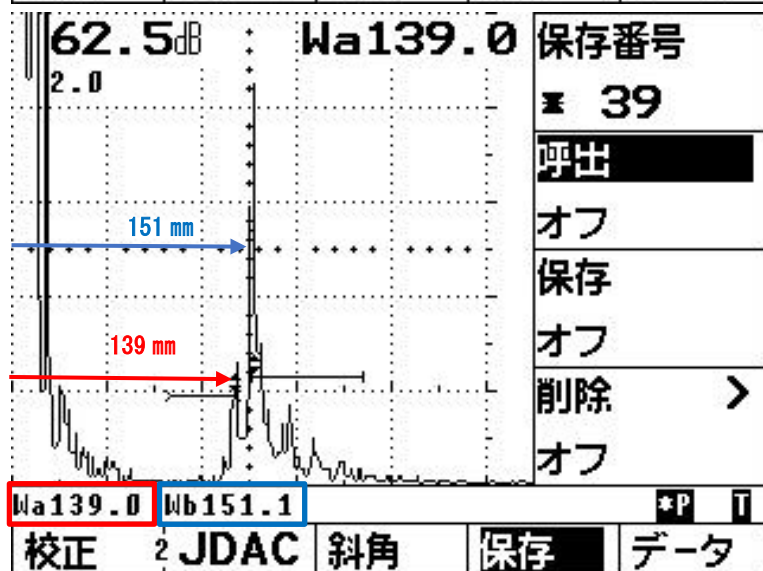
【図 9】

片面の探傷しかできないが、ガセットプレートが両振れの力を受けていると考え、き裂は両面に存在すると思われると報告した。



【図 10】

き裂によるエコーが背後の不溶着部より高く、き裂は深いと思われる



【図 11】

【図 10】と比べるとき裂のエコー高さが不溶着部よりかなり低く、き裂は浅いと思われる

4. JISによる二振動子の調整について

機器の調整は3ページに示したように二つの横穴を探傷し、連立方程式で入射点Pと屈折角 θ を同時に求めているが、JISの付属書では入射点Pと屈折角 θ をそれぞれ個別に求めている。

入射点

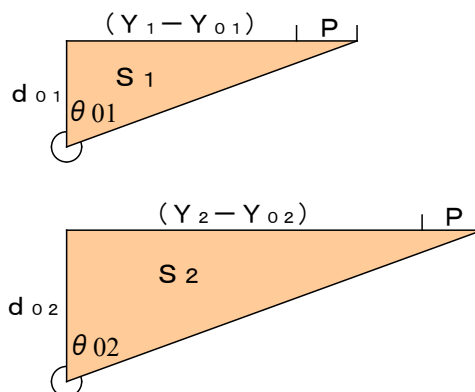
二つの横穴を探傷した時の三角形の面積 S_1 、 S_2 はそれぞれ

$$S_1 = \frac{d_{01}(Y_1 - Y_{01} + P)}{2} \dots\dots\dots \textcircled{3}$$

$$S_2 = \frac{d_{02}(Y_2 - Y_{02} + P)}{2} \dots\dots\dots \textcircled{4}$$

S_1 、 S_2 が相似であるからその面積比は横穴の深さの2乗に比例することから

$$\frac{S_2}{S_1} = \left(\frac{d_{02}}{d_{01}} \right)^2 \dots\dots\dots \textcircled{5}$$



⑤式に③、④を代入してJISの式は導かれている。

$$P = \frac{d_{01} \times (Y_2 - Y_{02}) - d_{02} \times (Y_1 - Y_{01})}{d_{02} - d_{01}} \dots\dots\dots \text{(H. 1) 式}$$

【図 12】

Pの計算結果は3ページ①、②式による結果に一致する。

屈折角

屈折角の計算は二つの横穴を探傷し入射点を求めたとき時の二つの三角形 S_1 、 S_2 を相似と見なさないで ($\theta_1 \neq \theta_2$ として) 計算し、それらの平均値を θ_{RB} として求めている。入射点Pを求めるときは二つの三角形を相似(その面積比が横穴の深さの2乗に比例する)であることから求めている事と考え方が統一されていない。

おまけに JISに書いてある式がミスプリントで、以下が正しい。

$$\text{(H. 2) 式} \quad (\text{誤}) \quad \theta_{01} = \frac{\tan^{-1}(Y_1 + P_1 - Y_{01})}{d_{01}} \quad (\text{正}) \quad \theta_{01} = \tan^{-1} \frac{(Y_1 + P - Y_{01})}{d_{01}}$$

$$\text{(H. 3) 式} \quad (\text{誤}) \quad \theta_{02} = \frac{\tan^{-1}(Y_2 + P_1 - Y_{02})}{d_{02}} \quad (\text{正}) \quad \theta_{02} = \tan^{-1} \frac{(Y_2 + P - Y_{02})}{d_{02}}$$

Pは(H. 1)式により共通 $\theta_{RB} = \frac{\theta_{01} + \theta_{02}}{2}$

これらJISの付属書の計算方法より3ページの“近藤の連立方程式”の方が理解しやすく、計算がシンプル。横穴の位置・間隔が頭に入っていればいきなり3ページ①②の式が書けます。

JIS のミスプリントのルーツは JSNDI 発行「超音波探傷試験実技参考書」にあった

2005 年(初版 1971 年)では

$$\theta_{01} = \tan^{-1}[(Y_1 + P_1) - Y_{01}] / d_{01} \quad \dots\dots (A)$$

2009 年(初版 1971 年)では

$$\theta_{01} = \frac{\tan^{-1}(Y_1 + P_1 - Y_{01})}{d_{01}} \quad \dots\dots (B)$$

記述形式に違いはあるものの誤りは、はるか昔から訂正されることなく綿々と続いていたようだ。同様に $\theta_1 \neq \theta_2$ の問題も実技参考書の発行当初からのようだ。

5. おわりに

- ・ 構造図や全体写真を載せると分かり易いのですが、応急措置として支保工までは設置したものの、補修工事が始まっていないので、あえて載せていません。
- ・ 「割れ」、「亀裂」、「き裂」については「き裂」を統一して使用しました。非破壊系では「割れ」土木学会では「き裂」、橋梁点検調書では「きれつ」が多いようです。
- ・ き裂の発生原因は気温による梁の伸縮で、ガセットプレートに接合されている大梁に、躯体との接合部に近い場所で横方向の力が働き、Web を介してガセットプレートの溶接部に繰り返しの曲げが働いたものです。 同のような事例で圧倒的に多い大規模倉庫の庇では築 10 年以下でき裂が発生している事例もあり、設計時にはこのような低サイクル疲労があまり考慮されていようです。
- ・ 初めて庇のき裂に遭遇した時は、気温が原因であるなら 1 日 1 サイクル、10 年で 3.6×10^3 回程度、気温の変動が少ない季節もあり、直感的にこんな N で割れるはずがない、風によるなら 10^6 回くらいは、と思っていましたが……
- ・ JIS 規格の誤り（ミスプリント）については、本ページ式(A)、(B)をよく見れば右辺と左辺の次元が違うので誤りに気づきますが、一般的には対比試験片「RB-SDH」で探傷器の調整をしなければこの式は使わないので気づくことはないと思います。 30 年以上前に端部エコー法を使ったときは「RB-SDH」を保有していなかったので STB-A3 で調整しました。 さらに、近年ではき裂深さの測定には PA や TOFD が主流で端部エコーは使わないと思いますが・・・
- ・ 車路や倉庫の庇のこの部分は気付かぬうちに疲労が進み、破断している例がたくさんあります。名古屋営業所では最近、磁粉探傷試験を渦電流探傷（ET）に替えて庇の調査をおこないました。本調査でも ET を試行し 5 ページのき裂先端の位置は磁粉探傷試験と一致していました。