

縦横リブが交差する隅肉溶接部の超音波探傷による可視化

北見工業大学	○学 生 員	高田 直幸
北見工業大学	フェロー	大島 俊之
北見工業大学	正 員	山崎 智之
北見工業大学	学 生 員	ムハマド S. ラーマン
(株)日本製鋼所	正 員	田中 秀秋
島田建設(株)	正 員	斉藤 隆行

1. はじめに

鋼構造物は加工性が良好であることやコンクリート構造に比べて非常に軽いこと、維持・管理が容易であるなどの理由から長大橋など様々な構造物に用いられてきている。しかし、道路橋示方書¹⁾では鋼床版橋のみに疲労に対する照査を行うことになっており、疲労に対して不利な構造になっている。疲労亀裂の発生が多く報告されている²⁾のが溶接継手部分であり、近年の建設費抑制という社会的要求を満たすためにも一つの構造物を長期間使用することが必要なので、その部分に生じた疲労亀裂を早期に発見し維持・補修していくことが重要である。

しかし、疲労亀裂の場合一般に欠陥形状がシャープで、亀裂面の空隙が小さいのでX線(RT)や超音波(UT)を用いても欠陥の検出を見落とす場合がある。さらに、縦横リブが交差する隅肉溶接部から発生する疲労亀裂は、探傷しようとする部分の周辺空間が十分に確保されなかったり、超音波を入射させる方向が限られたりする。そこで、本論文では超音波の入射角や探傷方法を変化させることにより、疲労亀裂の検出精度の向上を目指した。また、疲労試験中にひずみ測定の実行を行うことで疲労亀裂発生時の検出も行った。

2. 交差部への静的载荷試験

2. 1 試験概要

縦リブと横リブの交差部に静的曲げ载荷試験によるひずみ測定の結果と解析結果の比較検討を行った。载荷試験に用いた供試体は図1のように板リブ状のもので、スカラップ形状の異なる供試体(スカラップ無し、0型スカラップ、J型スカラップ)3種類である。スカラップ形状および、結果を比較する着目点を図1に示す。供試体は3種類ともに横リブ(200×300×12mm)、縦リブ(100×400×9mm)にSS400鋼材を用い、交差部にサイズ7

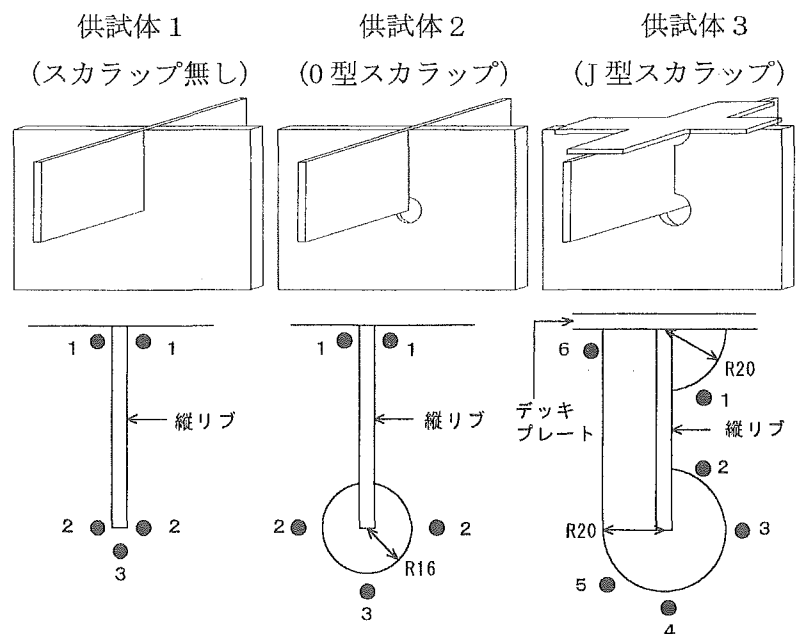


図1 実験供試体形状と着目点

Visualization of Fillet Joint Welding of Crosswise Ribs by Ultrasonic Inspection

By Naoyuki TAKADA, Toshiyuki OSHIMA, Tomoyuki YAMAZAKI, Muhammad S. RAHMAN
Hideaki TANAKA, Takayuki SAITO

mm の隅肉溶接をしてある。供試体 3 だけはスカラップの形状により左右均等に荷重がかかるように厚さ 9mm のデッキプレートをつけた。

横リブ下に支点を設け支持（支持間隔は 200mm）し、载荷位置は縦リブと横リブの交差部上で供試体 1、2 については 10kN、供試体 3 については 20kN の荷重をかけ、スカラップ周辺に張り付けたひずみゲージでひずみを測定した。解析には汎用構造解析プログラム MARC を使用した。

2. 2 結果比較

解析結果と静的载荷試験の測定結果を表 1 に示す。供試体 1、2 には 1 軸のひずみゲージを水平方向に張り付けたので、解析結果は水平方向の応力値を示している。供試体 3 については全ての着目点に 3 軸ゲージを張り付けたので、3 つのデータから最大主応力を計算し、解析結果と比較した。

表 1 各供試体の応力値 (kgf/cm²)

着目点	供試体 1		供試体 2		供試体 3	
	解析	測定	解析	測定	解析	測定
1	-92.2	-79.1	-66.8	-89.6	159.6	148.8
2	2.0	4.5	-5.4	-9.4	10.2	-22.9
3	5.8	24.8	9.8	1.4	0	-77.0
4					81.5	118.3
5					119.3	185.7
6					0	25.5

供試体 1、2 では着目点 1 で解析・実験ともに最大の圧縮応力になっている。供試体 3 では最大の位置は一致していないが着目点 1、5 において大きな引張応力が解析・実験ともに現れている。したがって、実際の応力分布も解析と一致していると考えられるので解析結果から疲労亀裂の発生する位置を予測して超音波探傷位置やモニタリング法を検討した。

図 2 は供試体 2 の横リブの水平方向応力分布図である。これによると、载荷点付近と支点付近に圧縮の応力集中箇所が現れ、スカラップ上部に引張の応力集中箇所が現れている。さらにこの部分は溶接の始端部になっているので、この部分から疲労亀裂が発生すると予測される。図 3 には供試体 3 の横リブの最大主応力分布を示す。同様な検討すると支点付近と下スカラップ周辺、上スカラップ周辺に応力集中箇所が見られる。特に上スカラップ周辺で発生している応力はデッキプレート方向と縦リブに沿って広がっている。上スカラップ周辺に応力集中が起こっているのは、供試体 2 と異なり荷重が直接横リブに载荷されないためであると考えられ、この位置は縦リブ・デッキプレートとの溶接部分に近いので、疲労亀裂は上スカラップ周辺の溶接部や下スカラップ上部の縦リブとの溶接部から発生すると予想することができる。

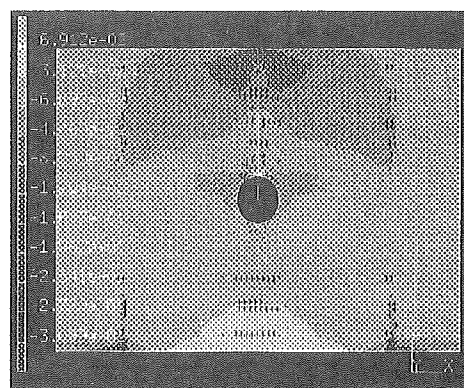


図 2 水平方向応力分布

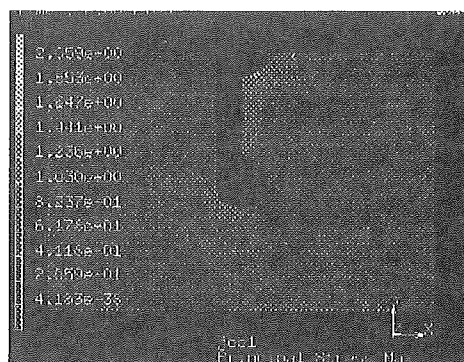


図 3 最大主応力

3. 疲労試験と超音波探傷試験

3. 1 試験概要

疲労試験は供試体 2 と供試体 3 について行った。それぞれの载荷条件を表 2 に示す。静的载荷試験と同様に縦リブと横リブの交差部に载荷した。繰り返し载荷により発生する疲労亀裂を超音波探傷試験により検出した。供試体 3 については亀裂発生のモニタ

表 2 载荷条件

	供試体 2	供試体 3
最大荷重	180kN	160kN
最小荷重	1kN	1kN

リング（疲労試験中にひずみを測定しその変化によって疲労亀裂の発生を検知）も同時に行った。超音波探傷は水浸法による斜角探傷法で行い、超音波の入射角を変化させて亀裂発生前後の画像及び波形を比較検討した。また、亀裂発生後では図4に示した直射法と1回反射法で探傷を行った。探傷は図5に示した測定システム⁴⁾で行い、画像処理や波形記録を行った。探触子には周波数 10MHz、水中焦点距離 80mm のものを使用している。

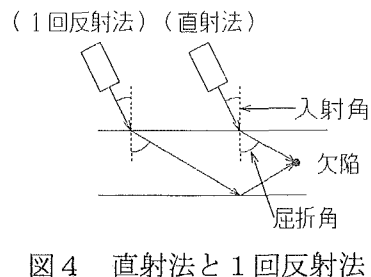


図4 直射法と1回反射法

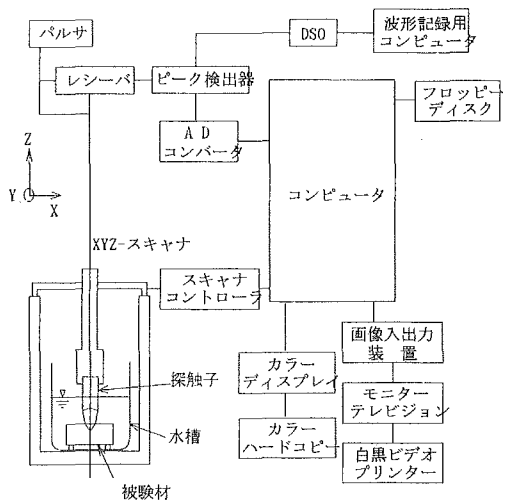


図5 測定システム

3. 2 超音波探傷試験結果

本実験での画像処理は強度データによるCスコープ画像とし、超音波エコーの振幅を 256 階調の白黒濃淡で表示しており、白く明るい部分がエコーの高い部分で、黒く暗い部分はエコーが低いか、エコーがない部分である。画像の上部にある線と数字は縮尺である。

① 供試体 2

供試体 2 の探傷位置を図 6 に、探傷画像を図 7 にそれぞれ示す。図 7 (a) は载荷 306 万回、(b) は载荷 316 万回のもので、探傷の入射角 18.9 度（屈折角 45 度）、1 回反射法による探傷画像（探傷範囲 30×50mm、ピッチ 0.1mm）である。着目部分のエコーは縦リブと横リブの接合部分が完全に溶け込んでいないために残っている面（肌すき図 8）からのものであり、その着目部分エコー強度（白黒濃淡）を比較すると (b) の方はエコーが弱くなっている。これは、疲労亀裂が溶接部から進展し、超音波の伝達経路に入り、そこでわずかな反射・散乱が起こったためと考えられる。

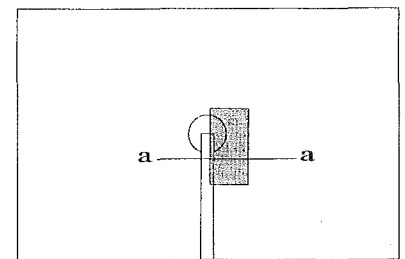
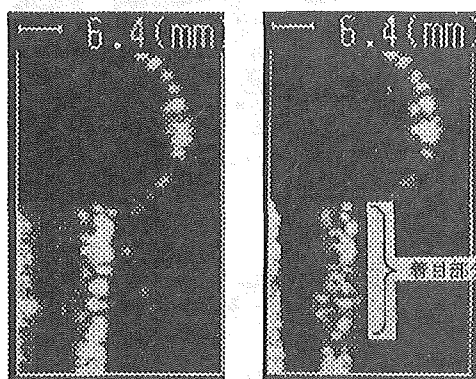


図6 供試体 2 探傷位置



(a) 载荷 305 万回 (b) 载荷 316 万回

図7 入射角 18.9 度（1回反射法）

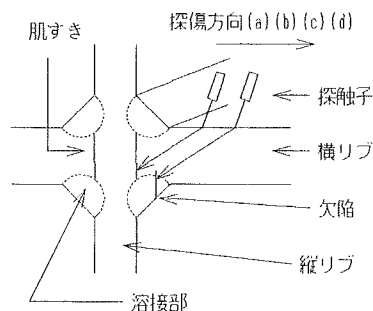
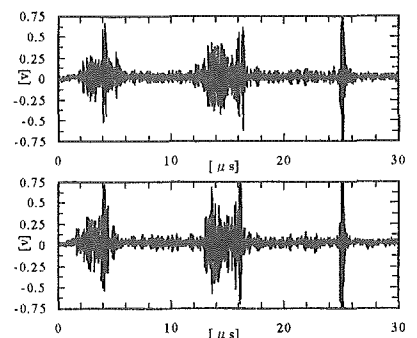
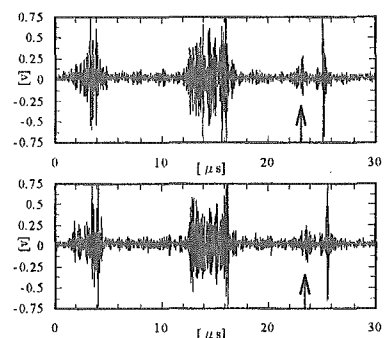


図8 超音波伝達経路
(a-a 断面)



(a) 健全部からの波形



(b) 亀裂部からの波形

図9 波形(入射角 18.9 度)

このときのエコー波形に着目して比較したものが図 9 である。図 9 (a) が健全部からのエコー波形、(b) は亀裂と予想される部分からのものである。2～5 μs のエコーは表面エコー、12～17 μs のエ

一は2次的な表面エコー（探触子と供試体表面を2往復する波）と考えられる。注目するエコーは25 μs の位置する波形で、これは肌すきからのものである。20~25 μs のエコーに注目すると(b)の亀裂部からの波形には(a)では見られない小さなエコーが確認（矢印）できる。これが反射・散乱の原因であり、疲労亀裂と考えられる。

また、図10は探傷条件を入射角22.5度（屈折角60度）とした直射法で探傷を行ったときの探傷画像（探傷範囲15×40mm、ピッチ0.1mm）である。図10では亀裂部からのエコーがCスコープ画像にも現れている。これは角度を変化させたことと斜角探傷の手法を1回反射法から直射法に変えたので、鋼材の中を超音波が伝達する距離が短くなり、亀裂からのエコーが強くなったからと考えられる。

図11にこの時のエコー波形を示す。(a)から(d)は走査方向を示しており、図8にあるように(a)から順に縦リブから離れていくことを示している。

図11(a)の0~2 μs のエコーは表面エコーであり、10 μs のエコーが肌すきからのものである。(a)で8 μs に現れているエコーに注目すると(a)→(b)→(c)→(d)と次第に強くなる。これは超音波が肌すきまで伝達する途中に亀裂部があるため、早い時間に亀裂からのエコーが現れたのである。

以上から供試体2については入射角が18.9度の時には亀裂からのエコーを画像としてとらえることはできなかったが、波形データを詳細に検討することで亀裂が発生したと断定できた。さらに、入射角を22.5度にし直射法で探傷することで亀裂からのエコーを画像でとらえることができた。以上のことをふまえて供試体3では入射角22.5度の画像もはじめて記録し、検討してゆくことにした。

② 供試体3

供試体3の探傷位置を図12に、探傷画像を図13、14にそれぞれ示す。図13(a)は载荷10万回、(b)は载荷230万回のもので、探傷の入射角18.9度（屈折角45度）とした1回反射法による探傷画像（探傷範囲30×20mm、ピッチ0.1mm）である。図14(a)は载荷10万回、(b)は载荷230万回の画像で、探傷の入射角を22.5度（屈折角60度）とした直射法による探傷画像（探傷範囲30×20mm、ピッチ0.1mm）である。探傷位置はそれぞれ図12に示した部分である。図

13と14の(a)には両方ともデッキプレートと横リブの溶接部中の肌すきからのエコーがとらえられている。(a)、(b)を比較すると、(a)にはなかった白く明るい部分が(b)に現れている。これは内部に新たな反射面が現れたことを示しており、疲労亀裂が発生した

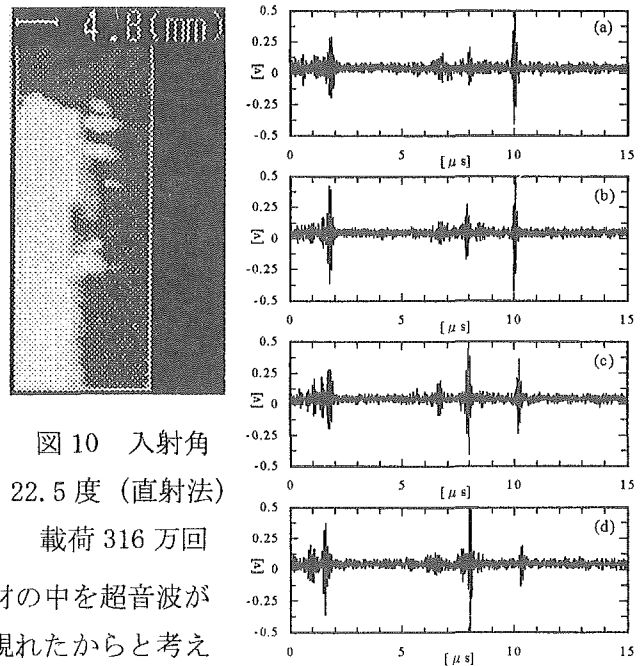


図10 入射角22.5度（直射法）
载荷316万回

図11 波形（入射角22.5度）

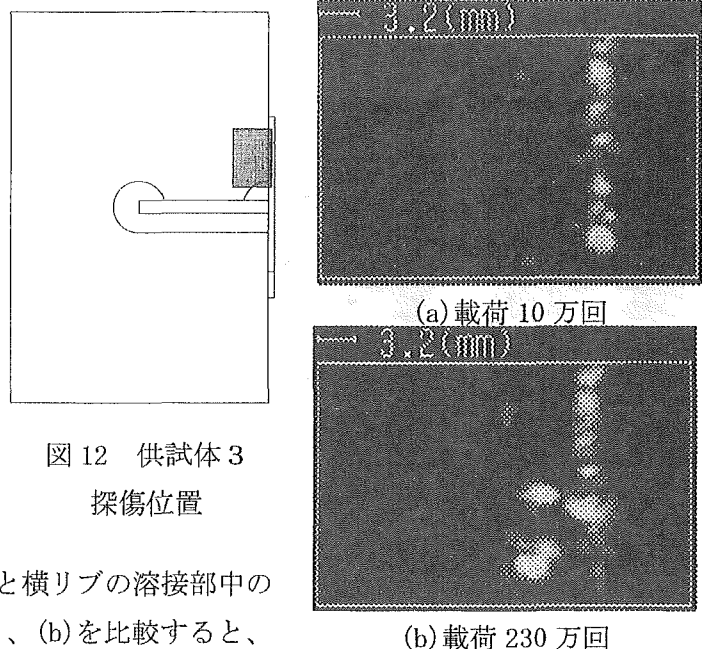
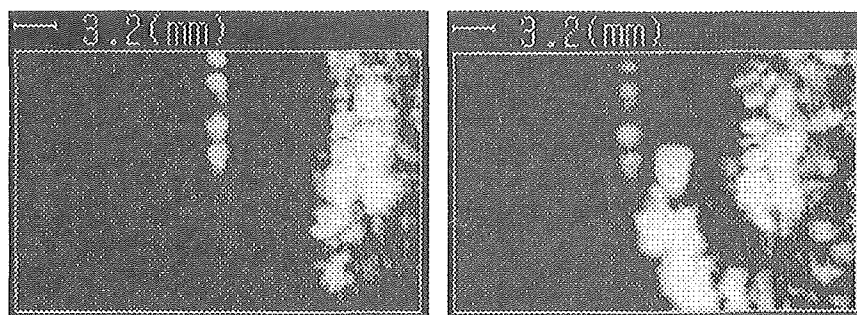


図12 供試体3
探傷位置

(a) 载荷10万回
(b) 载荷230万回

図13 入射角18.9度（1回反射法）

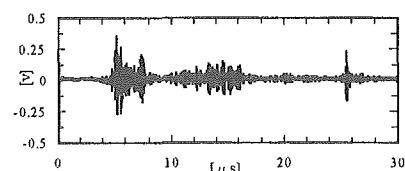


(a) 载荷 10 万回

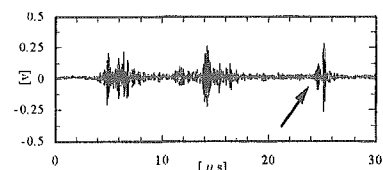
(b) 载荷 230 万回

図 14 入射角 22.5 度 (直射法)

ことによるエコーであると考えられる。このときの段階で画像から亀裂の長さはデッキプレートと平行に 13mm の大きさであることがわかる。図 15 は入射角 18.9 度の同じ位置における亀裂発生前後のエコー波形である。供試体 2 の時と同様に供試体 3 の場合も $26\mu\text{s}$ 付近の肌すきからのエコーより少し前の時間において新たな反射波 (図 15(b) 矢印部) が見られ、この波形が疲労亀裂からのエコー波形と考えられる。



(a) 亀裂発生前波形



(b) 亀裂発生後波形

図 15 波形 (入射角 18.9 度)

供試体 3 では入射角が 18.9 度、22.5 度の両方とも亀裂によるエコーを画像でとらえることができた。これは供試体 2 より亀裂面の角度が屈折角と直角に近くなっているためにエコーが強く反射し、映像としてとらえることができたと考えられる。

以上のことから入射角を変化することによって亀裂部からのエコーを C スコープ画像でもはっきりととらえることができた。このように疲労亀裂を超音波探傷で精度よく検出するためには、様々な方法で検討するとよいが、隅肉溶接部の疲労亀裂を検出する場合には溶接の影響を避けるためにも多少大きめの入射角がよいと考えられる。超音波探傷試験結果より静的载荷試験で予測した位置に疲労亀裂が発生していることが確認できた。

3. 3 ひずみのモニタリング

モニタリングとは観測項目を時系列のデータとして記録し、ワンステップ前のデータと比較することで維持管理に役立てようとする手法である³⁾。鋼構造物においてはひずみ計測によってモニタリングすることが多いので本実験でもひずみを測定し、疲労亀裂発生の目安とした。

ひずみの測定位置は亀裂が発生することによってひずみに変化が現れると予測できる部分を 2 点 (図 1 において着目点 1 と 2) とした。着目点 1 は水平方向ひずみ、着目点 2 は鉛直方向ひずみを計測した。実際の構造物におけるモニタリングと異なり今回の実験では供試体の設置条件が変化するのでそれによる影響を取り除くために亀裂が発生してもひずみにはあまり影響が現れないと予測できる部分にベンチマークとしてひずみゲージを張付け、供試体設置時にベンチマークが前回と同じひずみになるように調整した。

測定方法は疲労試験中にサンプリングレート 20Hz で 10 秒間ひずみを記録した。図 16 と 17 に最大荷重時のひずみの変化を示す。図 16 は着目点 1 のひずみ変化で、

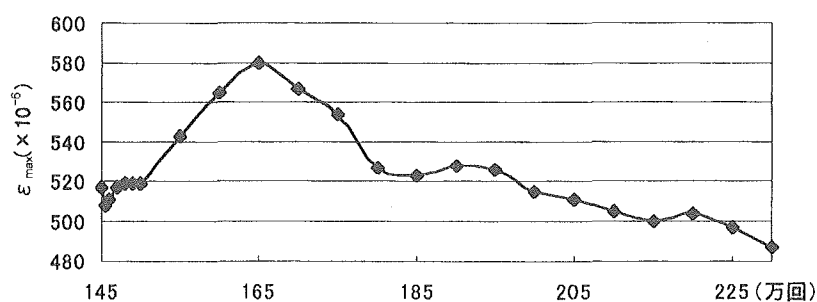


図 16 着目点 1 のひずみ変化

図 17 は着目点 2 のひずみ変化である。着目点 1 では引張りひずみ、着目点 2 では圧縮ひずみとなっている。図 16 の着目点 1 では 165 万回までひずみが増加する傾向にあったのだが、165 万回の $580 \mu \varepsilon$ を境に一転して減少し 230 万回までに $487 \mu \varepsilon$ へと $93 \mu \varepsilon$

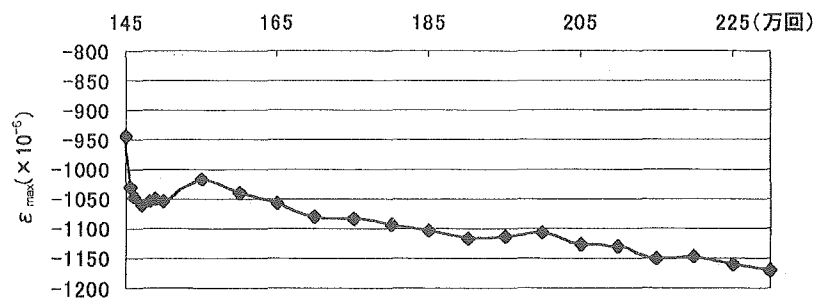


図 17 着目点 2 のひずみ変化

変化した。このことから 165 万回をすぎたあたりで供試体内部にごくわずかな亀裂が発生しその後 230 万回まで亀裂が進展していき超音波で探傷できるほどになったと考えられる。また、亀裂が発生し着目点 1 でのひずみが減少したことによって着目点 2 ではひずみ振幅が $-1057 \mu \varepsilon$ から $-1169 \mu \varepsilon$ へと $112 \mu \varepsilon$ 圧縮ひずみが増加したと考えられる。

本実験では超音波探傷のために供試体の着脱を繰り返し行ったための影響が現れたが実際の構造物におけるモニタリングには影響がないことである。モニタリングを行う際には亀裂によってひずみの変化を十分とらえることができる着目点を選択すれば、モニタリングは疲労亀裂の発生、進展の状況を把握するための効果が十分にあると考えられる。

4. まとめ

応力分布解析によって疲労亀裂発生の位置は予測することができるが、さらに正確な応力分布を求めるためには溶接形状や、溶接による残留応力なども考慮した解析が必要である。

超音波探傷により隅肉溶接内部に発生する疲労亀裂を精度よく検出するためには、一つの入射角ではなく適切な複数の入射角で探傷することが必要である。また、溶接の影響を避けるためにも多少大きめの入射角がよいと考えられる。また、C スコープ画像だけで判断できない場合も反射波形を検討することで疲労亀裂の発生を把握できる。

モニタリングは疲労亀裂の発見、進展の状況を把握するのに有効な手法である。さらに、データの信頼性を向上させればもっと精度良く検出することができる。

本研究を行う際に、北見工業大学工学部土木開発工学科の三上修一助教授と土木開発工学専攻の藤田真仁氏には多大なご指導をいただきました。ここに記して感謝の意を表します。また、平成 10 年度文部省科学研究費（代表者三上修一）の補助を受けました。ここに感謝いたします。

参考文献

- 1) (社) 日本道路橋協会：道路橋示方書・同解説（Ⅰ 共通編・Ⅱ 鋼橋編）、1996. 12
- 2) 土木学会：鋼床版の疲労、鋼構造シリーズ 4、1990. 9
- 3) 杵本：モニタリング技術、橋梁振動コロキウム'97 論文集、pp. 35-44、1997. 10
- 4) 大島、三上、山崎、Rahman、平：超音波探傷法における疲労亀裂検出精度の向上、鋼構造年次論文報告集、第 5 巻、pp. 295-302、1997. 11