

## 角溶接部の欠陥に対する補修溶接と残留応力除去焼鈍の効果

## FATIGUE PERFORMANCE OF REPAIRING WELDS AND RESIDUAL STRESS RELIEVING FOR CORNER WELD WITH WELD DEFECTS

竹名興英\*・伊藤文夫\*\*・下川浩資\*\*\*・三木千寿\*\*\*\*

By Koei TAKENA, Fumio ITOH, Hirosuke SHIMOKAWA and Chitoshi MIKI

In order to examine the fatigue performance of repairing welds and residual stress relieving for corner joint with weld defects, box section specimens of 300 mm in height, 130 mm in width and 3400 mm in length were tested. The fatigue strength of corner joints which were repaired by using arc-gouging and welding satisfied the allowable stress range for category B. The improvement of fatigue strength by stress relieving is not so significant. Based on these results, the repairing method by using arc-gouging and welding was adopted for the fabrication of the Seto bridges in Honshu-Shikoku bridge project.

Keywords: fatigue, residual stress, stress relieving

## 1. ま え が き

トラス弦材の角溶接を対象とした一連の大型疲労試験と破壊力学を用いた解析<sup>1)~3)</sup>によって、この継手の疲労強度を決定する主な要因はブローホールと溶接残留応力であることが明確にされた。前者については、その大きさと疲労強度の関係が定量的に明らかにされた。これに基づいて、本州四国連絡橋公団では調質高張力鋼を用いた部材に対してブローホールの許容寸法を定めた<sup>4)</sup>。実橋の部材の製作においては、この許容寸法を超えたブローホールに対する対策として、その欠陥部分をガウジング等によっては取り除いた後に再溶接する方法(補修溶接)がある。しかし、この方法では、補修溶接によって新たな欠陥を生み出す可能性があるため、その欠陥を残したままその部分の溶接引張残留応力をなんらかの方法で除去することも、所要の疲労強度を確保するための1つの方法と考えられる。このような考え方に基づいて、

低温応力緩和法の原理を応用して角溶接部の両側を電気ヒーターによって加熱膨張させる方法も研究<sup>5)</sup>されている。この研究では残留応力を低減することによって疲労強度がある程度向上すると述べている。

本論文では、角溶接のブローホールの補修溶接が疲労強度に及ぼす影響とブローホールをそのまま残して残留応力を低減したときの効果について研究した結果を報告する。

## 2. 試験方法

## (1) 試験体

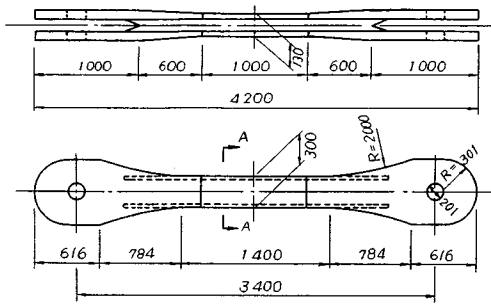
試験体の形状と寸法を図-1に示す。供試鋼材は調質高張力鋼 SM 58Q で、その化学成分と機械的性質をそれぞれ表-1と表-2に示す。試験体は、試験対象区間として中央に1mの平行部を有する外形300mm×130mmのボックス断面で、板厚は15mmである。溶接要領を表-3に示す。角溶接は、開先角度が60°、開先深さが8mmの部分溶け込みレ形グループ溶接で、1層のサブマージアーク溶接を用いた。ルートギャップは0.5mm以下とし、仮付け溶接の間はシール溶接を行った。溶接は、本州四国連絡併用橋の調質高張力鋼を使用する部材の製作に適用される基準、すなわち製作基準<sup>9)</sup>およびその追加事項<sup>10)</sup>に基づいて行われた。ただし、角溶接

\* 正会員 工博 新日本技研(元・本州四国連絡橋公団)  
(〒105 港区芝 2-1-23)

\*\* 正会員 建設機械化研究所(〒417 静岡県富士市大淵 3154)

\*\*\* 正会員 石川島播磨重工業(元・本州四国連絡橋公団)  
(〒100 千代田区大手町 2-2-1)

\*\*\*\* 正会員 工博 東京工業大学助教授 工学部土木学科  
(〒152 目黒区大岡山 2-12-1)



図一 試験体の形状・寸法

表一 供試鋼材の化学成分

(ミルシートによる)

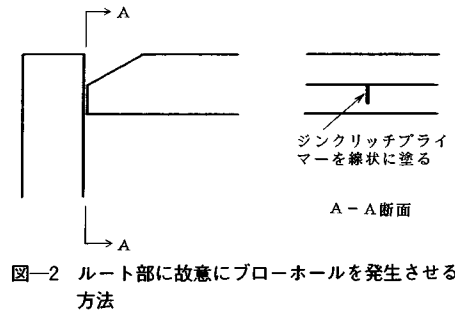
材 質	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Nb	V	Al	Ce	備 考	
	×100	×1000	×1000	×100	×100	×100	×100	×100	×100	×100	×100	×100	×100		
SM58Q	12	24	145	18	4	1								37	主 材
SM58Q	9	25	131	21	5	1		21			4			36	ピンPlate

表二 供試鋼材の機械的性質

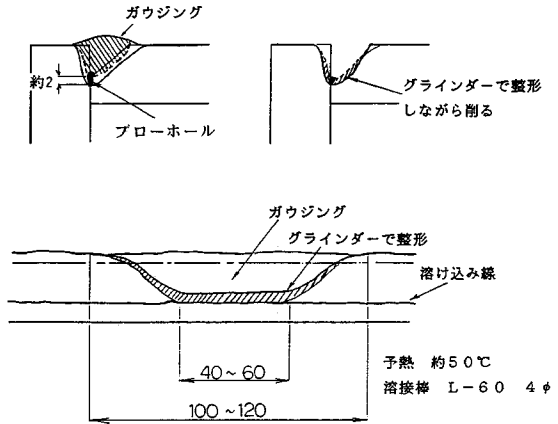
材質	板厚 (mm)	降伏点 (MPa)	引張強度 (MPa)	伸び (%)	衝撃値 N・m(-5・C)
SM58Q	15	539	647	34	251

表三 溶接要領

溶接方法	溶接材料	パス数	電流(A)
サブマージアーク	Y-DH, YF-15	1	700
電圧(V)	速度(cm/min)	仮付け溶接の材料	
30~32	35	MAG, NG-50T	



図二 ルート部に故意にブローホールを発生させる方法



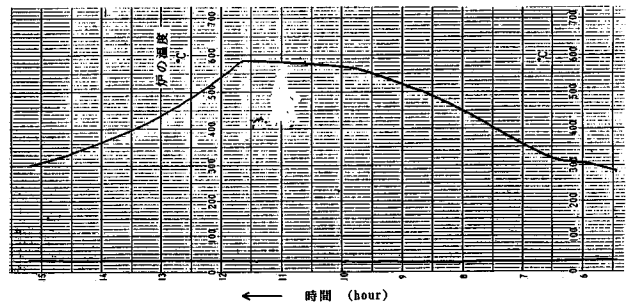
図三 補修溶接の要領

のルート部には故意にブローホールを発生させる目的で、図-2に示すようにルートフェース面に線状にジンクリッチプライマーを塗布した。

試験体はBHタイプ、BIタイプおよびBJタイプの3種類である。BHタイプは溶接をしたままの試験体である。BIタイプは補修溶接を行った試験体である。すなわち、超音波探傷によって検知した内接円の直径が1.5 mm(本州四国連絡併用橋の特A部材の許容寸法)以上のブローホールについて、図-3に示すようにその付近をまずガウジングによって溶け込み線の約2 mm手前まではつり取り、次にグラインダーによってルート線が線状に現われるまで研削した後、手溶接を行った。その溶接は、約50°Cに予熱して低水素系溶接棒(D-5816)を用いて行った。補修溶接を行った箇所は合計8か所である。

BJタイプは焼鈍によって残留応力を除去した試験体である。試験体4体を同時に熱風循環炉の内に加熱保持および炉冷を行った。その加熱曲線を図-4に示す。焼鈍し温度は約580°で約1時間加熱保持した後に、そのまま炉冷した。試験体の数は、BHタイプが3体、BIタイプが3体およびBJタイプが4体である。

(2) 溶接残留応力の測定



図四 残留応力処理のための焼鈍熱サイクル図

上記の試験体のうちBH-2試験体とBJ-4試験体を、疲労試験を行わないで溶接残留応力の測定に用いた。残留応力は、ゲージ長さが3 mmの防水型3軸ゲージをボックス外面に貼り付け、最終的に約35 mm×20 mm×15 mmの薄片に鋸で切断し、開放ひずみを測定することによって求めた。

(3) 疲労試験

疲労試験は動的能力4 MNの油圧サーボ制御方式の試験機を用いた。最大荷重は2.6 MNで、応力比は0で試験を行った。また、この試験で疲労亀裂の発生と進展性状を明らかにする目的で、疲労破面にビーチマークを残すために一定回数ごとに最小応力を上昇させて応力

範囲を半減させた。

(4) 縦方向破断調査

図-5に示すように、疲労試験後に角溶接を溶接線に沿ってルートを開き、溶け込み線の変化、ブローホールの有無と大きさおよび亀裂先端が板表面に達していない疲労亀裂（以降、これを潜在亀裂、板表面まで亀裂先端が達したものを破断亀裂をよぶ）の有無を調査した。この潜在亀裂については、さらに溶接線直角方向に破断させて、亀裂面を露呈させてピーチマーク等を観測することによって亀裂進展性状を調べた。

3. 残留応力の測定結果

測定結果を図-6に示す。最大引張残留応力は溶接ビード上に生じ、溶接したままのBH-2試験体では470 MPaで、焼鈍したBJ-4試験体で58 MPaであった。焼鈍しによって最大引張残留応力が12%に減少した。

4. 試験結果と考察

疲労試験結果を表-4に示す。破断寿命  $N_f$  には、ピーチマークを疲労破面に残すために応力範囲を半減した間の繰返し数は含まれていない。この表には、試験後の縦方向破断調査によるブローホールの大きさと潜在亀裂

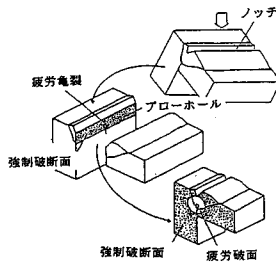


図-5 縦方向破断試験（亀裂はさらに横方向に破断させる）

表-4 疲労試験結果

試験体	応力範囲 MPa	破断寿命 $\times 10^4$ 回	疲労亀裂の 発生原因	ブローホールの内接円の直径d(mm)と数		
				破断亀裂の発生	潜在亀裂の発生	亀裂の発生なし
BH-1	168	177.7	ブローホール	1.5, 1.5	0.6, 1.2	$0.5 \leq d < 1.5 : 7$ $1.5 \leq d < 3.0 : 4$
-2	残留応力測定用試験体で疲労試験せず					
-3	196	79.0	ブローホール	1.6, 2.0	1.0, 1.6, 1.8, 2.2 , 2.2, 2.4, 2.4	$0.5 \leq d < 1.5 : 13$ $1.5 \leq d < 3.0 : 2$
BI-1	196	104.8	(板継部)			$0.5 \leq d < 1.5 : 2$ $1.5 \leq d < 3.0 : 0$
-2	168	207.0	(板継部)			$0.5 \leq d < 1.5 : 5$ $1.5 \leq d < 3.0 : 0$
-3	181	168.0	(板継部)			$0.5 \leq d < 1.5 : 2$ $1.5 \leq d < 3.0 : 0$
BJ-1	169	>286.0	(破断せず)			$0.5 \leq d < 1.5 : 8$ $1.5 \leq d < 3.0 : 3$
-2	216	60.0	ブローホール	1.9	1.4, 2.2	$0.5 \leq d < 1.5 : 5$ $1.5 \leq d < 3.0 : 0$
-3	196	65.7	ブローホール	2.2	-	-
-4	残留応力測定用試験体で疲労試験せず					

の有無を調査した結果も示す。ブローホールの大きさはその内接円の直径  $d$  で表わした。図-7に応力範囲と破断寿命の関係を示す。これらの図には設計基準<sup>6)</sup>の設計寿命曲線も示す。この継手の所属等級はB等級である。

補修溶接を行ったBI試験体は、すべての試験体で試験対象区間外である板継部分より発生した疲労亀裂によって破断した。写真-1に、補修溶接付近の角溶接を溶接線に沿ってルートを開いた状態を示す。補修溶接した部分で溶け込み線が変化し、溶け込み量が大きくなっているのがわかる。のど厚や溶け込み線の変化等を測定した結果を表-5に示す。補修溶接の始端および終端では、補修溶接によって溶け込み線は変化していないので（図-3参照）、それらののど厚は補修溶接していない部分と同じと考えられる。したがって、補修溶接の中央ののど厚と始末端の平均ののど厚との差が補修溶接による溶け込み量の増加と考えられる。その溶け込み量の増加は表-5に示すように約2 mmである。本州四国連絡併

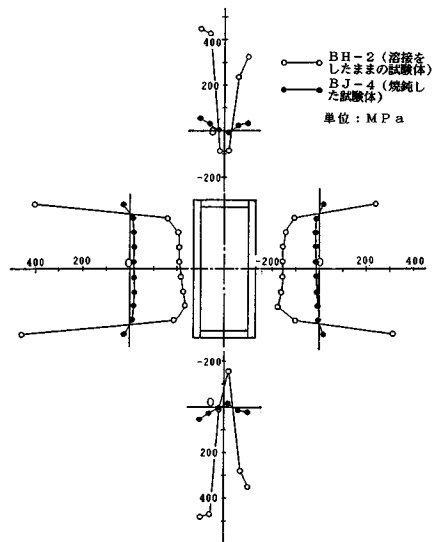


図-6 残留応力の分布

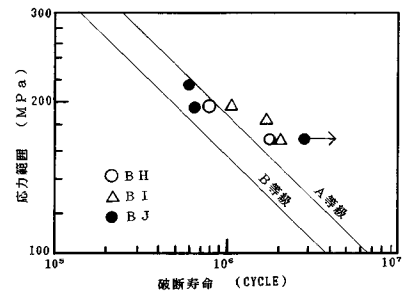
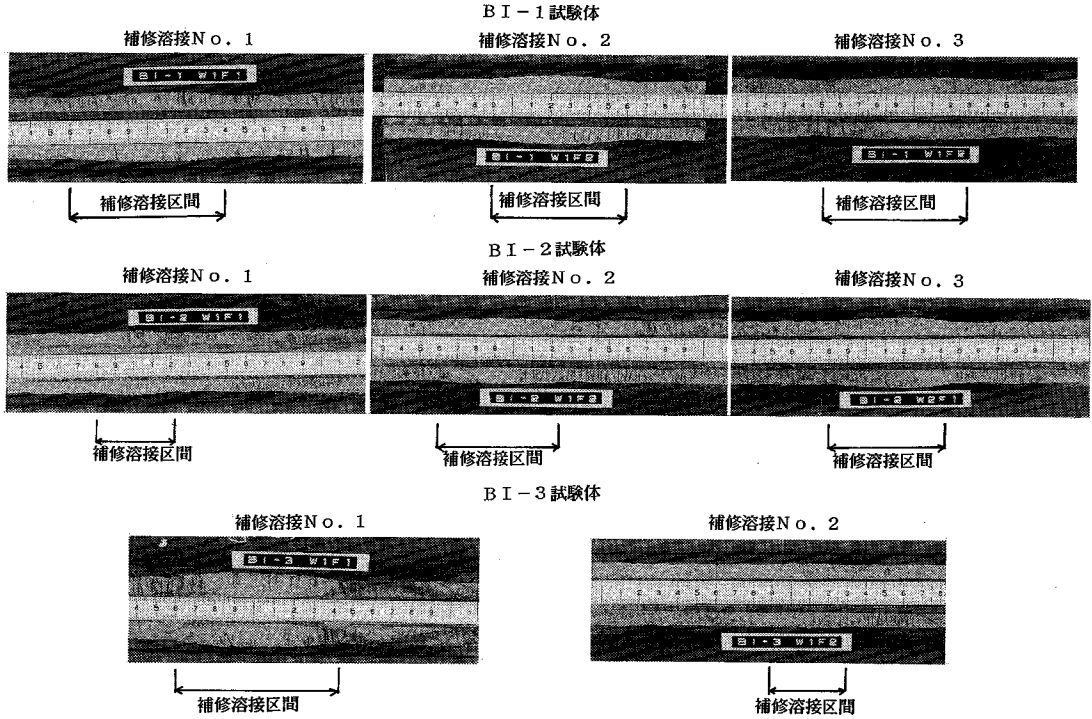


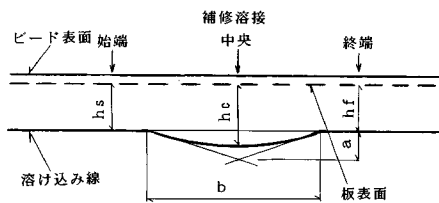
図-7 疲労試験結果



写真—1 補修溶接の溶け込み状態

表—5 補修溶接部付近の溶け込み線の変化

試験体 No.	補修溶接 No.	のど厚 (mm)			溶け込み深さの差 $h_c - (h_a + h_b)/2$	溶け込み線の変化率 $a/b$
		補修溶接始端 $h_a$	補修溶接終端 $h_b$	補修溶接中央 $h_c$		
BI-1	1	8.5	9.0	10.5	1.75	0.06
	2	9.5	9.0	11.5	2.25	0.09
	3	9.0	9.0	10.0	1.0	0.07
BI-2	4	8.5	8.5	10.0	1.5	0.08
	5	8.5	9.0	10.5	1.75	0.08
	6	9.0	10.0	11.5	2.0	0.06
BI-3	7	8.5	8.5	12.5	4.0	0.11
	8	9.5	9.5	10.3	0.8	0.05
平均±標準偏差		9.0±0.4	9.1±0.5	10.9±0.9	1.9±1.0	0.08±0.02



用橋の製作では、溶け込み線の変化が異常と判定し補修する場合の判定基準は、表—5 に示す変化率  $a/b$  が 0.3 以上を目安としている<sup>11)</sup>。これらの試験体の補修溶接における変化率の最大値は 0.11 であり、その目安の値に比べてかなり小さく、補修溶接した部分からは疲労亀裂が全く発生しなかった。BI 試験体の疲労強度は A 等級設計寿命曲線以上で、所属等級である B 等級の設計寿命曲線に対して十分な余裕がある。すなわち、補修溶接を行った場合の疲労強度は、一般にその設計寿命曲線を十分満足する。また、表—4 に示すように、超音波検査を

行った試験対象区間では許容値の 1.5 mm 以上のブローホールは存在しなかった。

溶接したままの BH 試験体と焼鈍した BJ 試験体は、表—4 に示すように破断亀裂の起点となったブローホールの大きさはほぼ等しい。それらの疲労強度は応力範囲の比較的高い場合はほぼ等しく、残留応力低減による改善効果は認められない。しかし、応力範囲が 168 MPa の BH-1 試験体は破断したが、それとほぼ等しい応力範囲である 169 MPa で試験を行った焼鈍した BJ-1 試験体は破断せず、試験後の調査でも亀裂は発見されていない。BH 試験体と BJ 試験体のそれぞれについて、内接円の半径が 0.5 mm 以上のブローホールの頻度分布と疲労亀裂の発生したブローホールの頻度分布を図—8 に示す。この図では、横軸の高さで応力範囲を示すようにした。応力範囲が大きくなるに従って疲労亀裂の発生率が高まるのがわかる。応力範囲の比較的高い BH-3 試験体と BJ-2 試験体を比較すると、焼鈍を行っても亀裂の発生率はほとんど変化しないことがわかる。応力範囲が比較的低い BH-1 試験体と BJ-1 試験体を比較すると、焼鈍を行うことによって亀裂の発生率が小さくなるのがわかる。著者らは疲労亀裂が発生したブローホールの面積あるいは内接円の半径と疲労強度の相関性が大きいことを示した<sup>3)</sup>が、この論文と同様に破壊力学の手法を用いて、本試験のブローホールから発生し

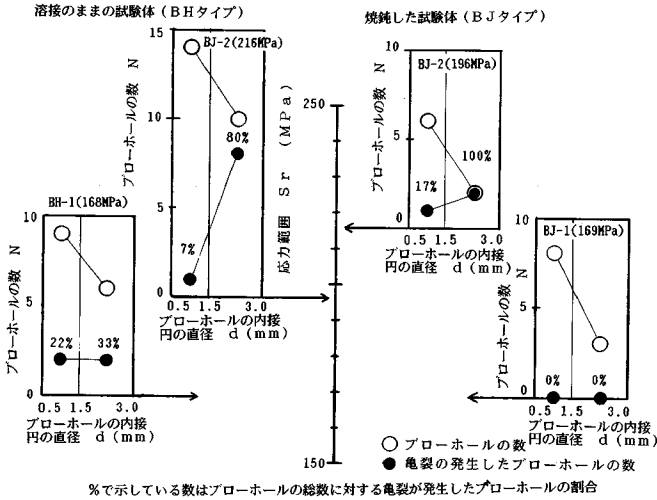


図-8 プローホールの大きさ、疲労亀裂の発生割合および応力範囲の関係

た破断亀裂および潜在亀裂を繰り返し数 200 万回の疲労強度  $S_{200}$  に換算した値とプローホールの内接円の半径  $a_{in}(=d/2)$  の関係を図-9 に示す。この解析の仮定を下記に示す。

- ① 疲労亀裂は、繰り返し数のごく初期にルートより発生し円形に進展する。したがって、応力拡大係数は次式を用いた (図-10 参照)。

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{\sec(\frac{\pi \lambda}{2})}{2}} \cdot \sqrt{\frac{\sin(2 \lambda \epsilon)}{2 \lambda \epsilon}}$$

- ② 最終亀裂半径はルートから板表面までの距離 (のど厚) の 90 % にした。
- ③ 応力拡大係数と亀裂進展速度の関係は次式を用いた。これは溶接残留応力のある継手の実験式<sup>8)</sup>である。

$$\frac{da}{dN} = 5.47 \times 10^{-9} (\Delta K^3 - 2.5^3)$$

$$\frac{da}{dN} : \text{mm/cycle}, \Delta K : \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

図-9 には比較のために、調質高張力鋼を用いたトラス構造試験体、ボックス断面試験体および板タイプ試験体の 5 %、50 %、95 % 非破壊確率線<sup>3)</sup>、および本試験体と同じ形状で非調質鋼 SM 50 Y を用いた試験結果<sup>7)</sup>も示す。半径  $a_{in}$  が同じ場合、非調質鋼の方が疲労強度がかなり高い。調質高張力鋼においては、溶接をしたままの BH タイプは、応力範囲の比較的に低い BH-1 試験体 (168 MPa) と比較的に高い BH-3 (196 MPa) 試験体と有意差がない。焼鈍した BJ タイプは、応力範囲の比較的に低い BJ-1 試験体 (169 MPa) では疲労亀裂が発生しなかったが、応力範囲の比較的に高い BJ-2 試験体

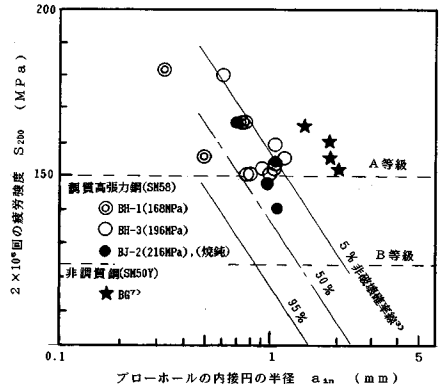


図-9 プローホールの内接円の半径と疲労強度の関係

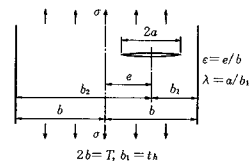
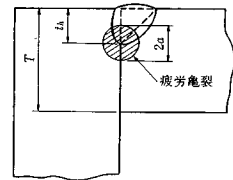


図-10 疲労亀裂のモデル化

(216 MPa) は上記の BH タイプと有意差がない。このことは、応力範囲が比較的高い場合は、残留応力をほとんど除去しても疲労強度が向上しないことを表わしている。

溶接継手と母材の亀裂進展速度を調べた研究<sup>8)</sup>では、引張残留応力が小さくても亀裂進展下限界応力拡大係数範囲  $\Delta K_{th}$  はかなり低下し、亀裂が安定して進展する領域では、その速度は溶接継手と母材とほとんど差がなかった。また、溶接したままの試験体と残留応力を低減した試験体の疲労破面に残されたピーチマークから進展速度と応力拡大係数範囲の関係を調べた研究<sup>5)</sup>では、両者にほとんど差がなかった。これらのことと、上記の本研究の結果から、亀裂発生寿命が期待できる条件の場合 (プローホールが小さかったり応力範囲が低い場合) は溶接残留応力を低減することによって疲労強度の向上を期待できるが、疲労亀裂が繰り返し数のごく初期に発生する条件の場合は溶接残留応力を低減させても疲労強度にほとんど影響しないと考えられる。現状では、残留応力の低減による疲労強度の向上が期待できる条件 (プローホールの大きさと応力範囲の関係) が明確でないこ

と、および残留応力を測定する非破壊検査方法が確立していないこと等を考慮すると限界寸法を超えたブローホールの補修対策としては補修溶接の方が適切と考えられる。

## 5. 結 論

角溶接に発生したブローホールを2種類の方法で補修した継手の疲労強度について検討した結果、得られた主な結論は次のとおりである。

(1) ブローホールの存在する付近を所定の要領に従ってガウジングによってはつり取り、さらにグラインダーによって仕上げた後に溶接した場合、一般にその疲労強度はこの継手の所属等級Bの許容疲労強度を十分満足する。補修溶接によって溶け込み量の増加は約2mmであり、溶け込み線の形状変化はなめらかであり本州四国連絡併用橋の製作での判定基準を十分満足する。

(2) ブローホールの存在する付近の残留応力を焼鈍により低減させた継手では、応力範囲が低い領域では、ブローホールからの疲労亀裂の発生を防止できる可能性は認められる。しかし、その効果は広い応力範囲で確実に期待できるとはいえない。

(3) 以上の実験結果および残留応力の除去を非破壊で確認する方法が確立していないことから、限界寸法を超えたブローホールに対する対策には補修溶接を本州四国連絡併用橋では採用した。

: Fatigue Strength of Large-Sized Longitudinal Butt Welds with Partial Penetration, 土木学会論文集, No. 332, 1982. 6.

- 2) Tajima, J., Takena, K., Miki, C. and Itoh, F. : Fatigue Strength of Truss Made of High Strength Steels, 土木学会論文集, No. 341, 1981. 1.
- 3) Takena, K., Hirano, S., Itoh, F. and Miki, C. : Fatigue Strengths of Box-Section Truss with Corner Joints, 土木学会論文集, No. 380/I-7, 1987. 4.
- 4) 久保村・下川・竹名：鉄道併用長大橋建設のための新技術の開発, 土木学会誌, 第38巻, 1983. 6.
- 5) Fukazawa, M., Natori, T., Terada, H. and Akashi, S. : Effect of Stress Relief on Fatigue Strength of High Strength Steel Corner Joint with Blowhole, 土木学会論文集, No. 356/I-3, 1985. 4.
- 6) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書, 1983. 3.
- 7) 土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究小委員会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書, 1984. 3.
- 8) Miki, C., Nishino, F., Hirabayashi, Y. and Takena, K. : Influence of Residual Welding Stress on Fatigue Crack Growth Rate, 土木学会論文集, No. 330, 1983. 2.
- 9) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準・同解説, 1977. 3.
- 10) たとえば、本州四国連絡橋公団：岩黒島橋主桁の調質鋼を用いた部材のかど溶接に対する鋼橋等設計基準の特記事項, 1982. 2.
- 11) 多田和夫：本四連絡併用橋の溶接施工一大鳴門橋一, JSSC, Vol. 21, No. 223, 1985. 4.

(1988. 8. 25・受付)

## 参 考 文 献

- 1) Miki, C., Tajima, J., Asahi, K. and Takenouchi, H.