

すみ肉溶接と接着接合を併用したあて板継手の疲労特性*

廣畑 幹人**, 伊藤 義人***

Fatigue Characteristics of Patch Plate Joints by Fillet Welding Assisted with Bonding*

by HIROHATA Mikihiro** and ITOH Yoshito***

A series of fatigue experiments and elastic analysis were carried out for investigating fatigue characteristics of patch plate joints assembled by fillet welding assisted with bonding. In the case that fatigue cracks occurred at the weld toe by the 4-points bending fatigue experiment, the fatigue life of joints assembled by welding and bonding (WB specimens) were almost the same as those by only welding (W specimens). The elastic analysis simulating the 4-point bending loaded situation on W and WB specimens was performed for elucidating its reason. The stress concentration at the weld toe was even high in the WB specimens. Therefore, the fatigue life of WB specimens was not longer than that of W specimens. On the other hand, the stress around the weld root of WB specimen was around 30% of that of W specimen. The possibility of stress reduction effect by bonding was indicated around the weld root rather than around the weld toe. In order to verify this possibility, the 4-point bending fatigue experiment was performed by setting the specimens so that the tensile stress was applied on the weld root. It was confirmed that the fatigue cracks occurred from the weld root in both of W and WB specimens. The fatigue life defined in this study of WB specimens was from 4 to 8 times longer than that of W specimens when the applied nominal stress range was under 175 MPa. The fatigue life defined in this study of WB specimens was from 2 to 3 times longer than that of W specimens when the applied nominal stress range was over 200 MPa. The results indicated the fatigue life improvement of patch plate joints by fillet welding assisted with bonding when the fatigue cracks occurred at the weld root.

Key Words: Patch plate joints, Fillet welding, Bonding, Fatigue, Elastic analysis

1. 緒 言

橋梁等の社会基盤構造物の劣化・損傷が顕在化してきており、適切な維持管理・補修補強により構造物の長寿命化を図ることが重要となってきた。鋼構造物では、腐食による板厚減少および疲労き裂の発生・進展が劣化・損傷の主な要因となっている^{1, 2)}。腐食による減厚および疲労き裂に対する補修補強方法として、損傷した部位にあて板を接合する方法が用いられることが多い。あて板接合部の施工性や構造的な特徴を考慮し、接合方法としてボルト接合、接着接合、溶接接合が取捨選択される。厳しい腐食環境にある港湾鋼構造物の鋼管杭では、補修部に高い水密性が要求されるため、腐食減厚部にあて板を溶接接合する補修方法が採用される³⁾。また、疲労き裂に対しては、ガウジングによるき裂の除去、埋戻し後に作用応力を低減するためのあて板が接合される²⁾。しかし、溶接によるあて板接合では、補修後の供用中に基板とあて板のすみ肉溶接部から疲労き裂が発生することが懸念され²⁾、あて板補修に対する溶

接接合の適用は他の接合方法に比べ採用されることが少ないのが現状である。

このような問題に対し、著者は、あて板補修のための接合方法としてすみ肉溶接と接着接合を併用することに注目した⁴⁾。すみ肉溶接と接着接合を併用することで溶接部の応力を緩和させられるか否かを明らかにするため、接着接合を併用したすみ肉溶接によるあて板継手の静的引張強度特性について基礎的な検討を実施した⁵⁾。実験の結果から、すみ肉溶接単独の継手に比べ、すみ肉溶接に接着接合を併用した継手の弾性限界強度が向上することを確認した。しかし、すみ肉溶接と接着接合の併用が溶接部周辺の応力状態および継手の疲労寿命に及ぼす影響については十分に検討できていない。本研究では、すみ肉溶接と接着接合を併用したあて板継手の応力分布特性を明らかにし、接着接合の併用による継手の疲労寿命の向上効果について検討するため、一連の実験および数値解析を実施する。

2. 実験供試体

2.1 供試鋼材および接着剤

供試鋼材は板厚 12 mm および 9 mm の SM400A であり、溶接材料は JIS Z3312 YGW12 に対応する軟鋼・490 MPa 級高張力鋼用ワイヤ(ワイヤ径: 1.2 mm) である。供試鋼材および溶接材料の化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。

*受付日 平成27年5月25日 受理日 平成27年7月21日

**正 員 名古屋大学大学院 工学研究科 Member, Graduate School of Engineering, Nagoya University

*** 名古屋大学大学院 工学研究科 Graduate School of Engineering, Nagoya University

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties.

	Chemical compositions (mass%)					Mechanical properties		
	C	Si	Mn	P	S	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Base plate: SM400A (t=12 mm)	0.16	0.20	0.53	0.026	0.005	304	455	30
Cover plate: SM400A (t=9 mm)	0.11	0.22	0.57	0.021	0.015	315	434	31
Weld metal: YGW12	0.09	0.44	0.96	0.012	0.012	460	540	31

Table 2 Mechanical properties of bond subjected to heating.

Mechanical properties (MPa)	Heating temperature (°C)			
	Not heated	150	200	250
Elastic modulus	3.8×10 ³ (25.6)	3.7×10 ³ (123.6)	2.9×10 ³ (69.9)	3.1×10 ³ (119.5)
Tensile strength	35.7 (2.3)	40.0 (7.1)	34.2 (6.1)	38.4 (4.7)
Tensile lap-shear strength	29.3 (0.6)	32.4 (1.2)	32.7 (0.4)	32.4 (0.3)

(): Standard deviation

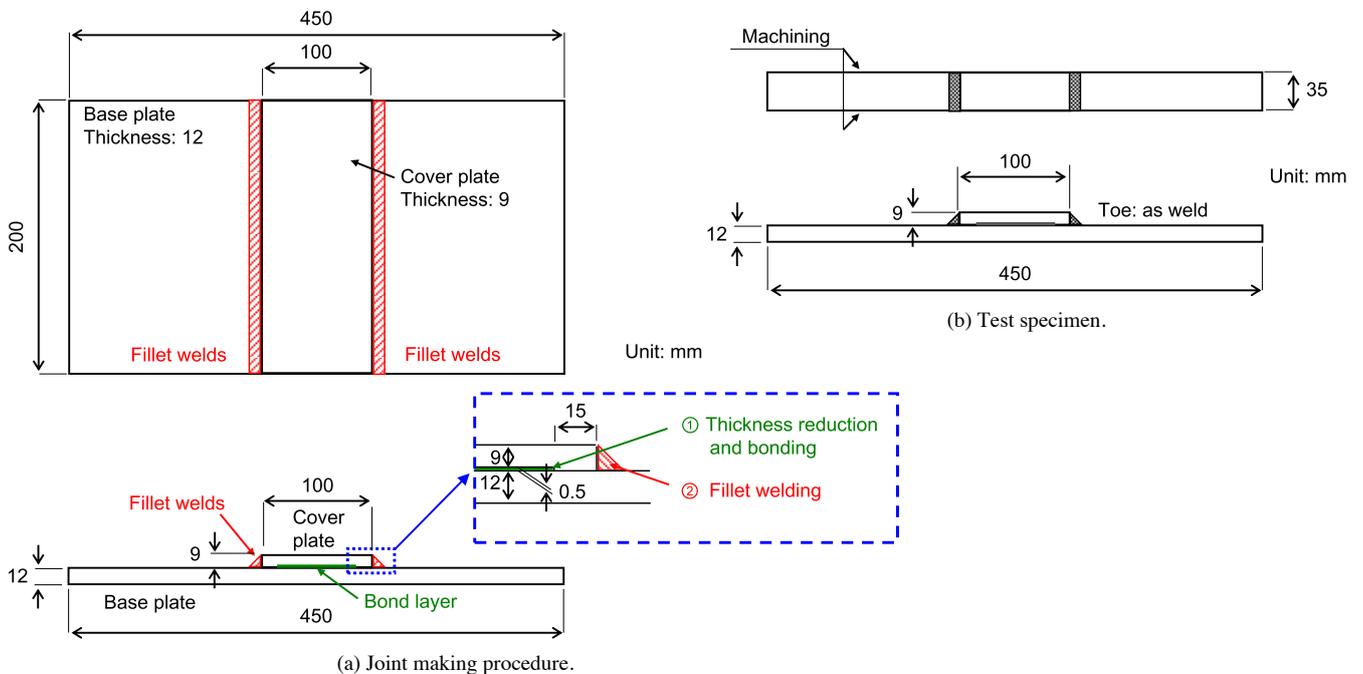


Fig. 1 Joint making procedure and test specimen.

また、すみ肉溶接に併用する接着剤として、耐熱型エポキシ樹脂系接着剤を使用した。溶接部近傍の接着剤は溶接による高温に晒されるため、材料特性が劣化する。本研究で用いた接着剤の常温下における材料特性ならびに高温曝露後の材料特性を明らかにするために実施した引張試験⁶⁾および引張せん断接着強さ試験⁷⁾の結果を Table 2 に示す⁵⁾。引張強さ、引張せん断接着強さについては、加熱なしの場合に比べ、250℃ までの加熱では接着剤の熱硬化の影響により強度がやや上昇した。一方、引張弾性率については、加熱なしの場合と比べ 150℃ 加熱の場合はほとんど変化がないが、200℃ 以上の加熱では弾性率が 30% 程度低下した。

2.2 継手の製作方法

本実験に使用したあて板継手の製作過程を Fig. 1 に示す。長さ 450 mm、幅 200 mm、板厚 12 mm の SM400A 鋼板 (Base plate : 基板と称す) の中央部に、長さ 100 mm、幅 200 mm、板厚 9 mm の SM400A 鋼板 (Cover plate : あて板と称す) を接着接合した。ただし、あて板の中央部の幅 70 mm の領域は 0.5 mm の減厚加工が施してあり、この減厚部分にブラスト処理を施した後、接着剤を塗布して基板とあて板を接合した。基板の接合面についてもあて板と同様にブラスト処理を施している。接着剤が硬化するまで十分

に養生した後、あて板の端部と基板を CO₂ 半自動溶接によりすみ肉溶接（溶接条件；電流 120 A，電圧 20 V，速度 5.2 mm/s）した。溶接後、継手を幅 35 mm に切断し、1 つの継手から 4 体の供試体を得た。幅 200 mm の継手 2 つから、8 体の供試体を作製した。溶接と接着を併用し作製した供試体を、溶接—接着供試体（記号：WB）と称す。なお、上述の接着の工程を省略することで、溶接のみによる供試体（溶接供試体，記号：W）も 8 体作製した。

ところで、上述のように中央部を減厚したあて板を使用した理由であるが、著者が実施した既往の実験⁵⁾では、減厚していない均一な厚さのあて板を用いて溶接—接着供試体を作製した。この場合、ルート部から約 15 mm の領域において、溶接時の温度が 150℃ 以上になりルート部に近接する部分で接着剤が焼失あるいは変色している様子が見受けられた。ルート部に近接する接着剤が焼失し気化することで溶接部にブローホール等の欠陥が生じることを避けるため、本実験では、ルート部近傍に接着剤が付着しないようにあて板の端部の 15 mm の領域には接着剤を塗布しないこととした。そのためにあて板の中央部（全幅 100 mm のうち、70 mm）を 0.5 mm 減厚し、減厚部にはのみ接着剤を塗布してあて板を接合したが、Fig. 2 に示すように端部にも硬化前に接着剤が浸透していた。しかし、溶接後に継手を切断し断面を観察したところ、ブローホール等の明らかな欠陥は確認されなかった。

3. 疲労実験

3.1 実験方法

2. で作製した継手供試体に対し、Fig. 3 に示すように 4 点曲げ载荷による疲労実験を実施した。あて板およびすみ肉

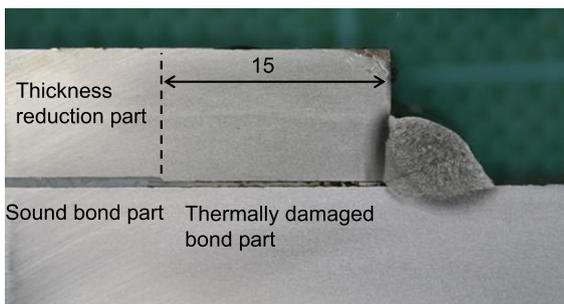


Fig. 2 Cross section of WB specimen.

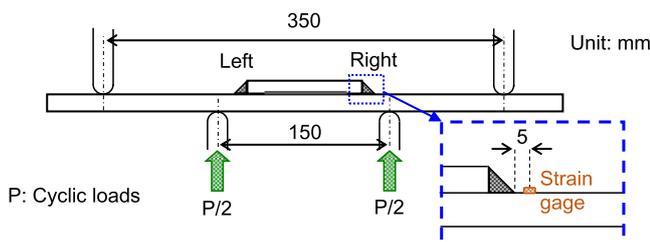


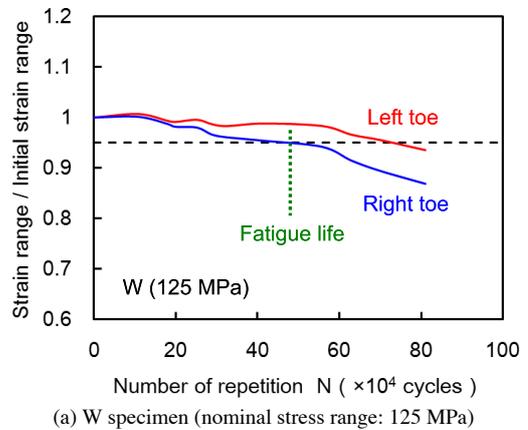
Fig. 3 Loading and supporting positions.

溶接部が等曲げ領域の中に含まれるように载荷ジグの寸法を決定し、すみ肉溶接の止端部に曲げによる引張応力が作用するように载荷した。曲げによる引張応力から公称応力範囲を決定し、応力比は 0.1 とした。

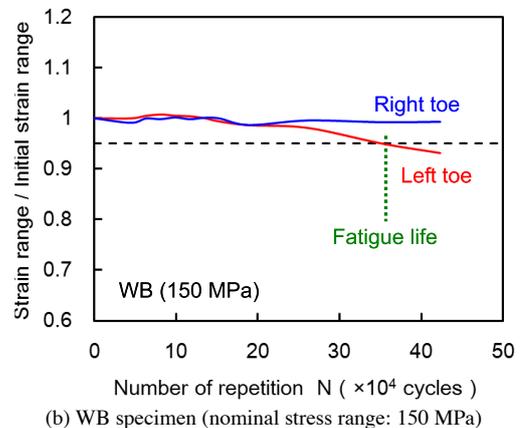
また、供試体の幅方向の中央において、左右両方の溶接止端部から 5 mm 離れた位置の基板表面にひずみゲージを貼り付け、繰り返し载荷中の供試体長さ方向のひずみ振幅を測定した。止端部に疲労き裂が発生すると、この位置のひずみ振幅が減少することから、ひずみ振幅が初期値から 5% 減少した時点を経済寿命とした⁸⁾。

3.2 実験結果

溶接供試体および溶接—接着供試体それぞれ 4 体ずつを疲労実験に供した。実験中のひずみ振幅の測定結果の例を Fig. 4 に示す。繰り返し载荷回数の増加に伴い、ひずみ振幅が徐々に減少する傾向が確認できた。ひずみ振幅が初期値から 5% 減少した時点では目視では疲労き裂は明瞭に確認できなかったが、その後も 10~20 万回程度の载荷を繰り返し、側面に対し磁粉探傷試験を実施したところ、Fig. 5 に示すように、溶接止端部に疲労き裂が発生していることが確認できた。溶接供試体および溶接—接着供試体のいずれも、全ての供試体において溶接止端部に疲労き裂が生じていた。また、疲労き裂が発生した溶接止端部の近傍に貼り付けたひ



(a) W specimen (nominal stress range: 125 MPa)



(b) WB specimen (nominal stress range: 150 MPa)

Fig. 4 Reduction of strain range around weld toe.

ずみゲージにより測定したひずみ振幅が減少しており、き裂の発生と対応していることを確認した。

なお、磁粉探傷試験により疲労き裂が明瞭に確認できた時点で繰り返し载荷を終了した。き裂の進展により破断した供試体はなかった。

各供試体の作用公称応力範囲と疲労寿命の関係を Fig. 6 に示す。実験を実施した公称応力範囲において、溶接供試体および溶接一接着供試体の疲労寿命に大きな差はなかった。すなわち、すみ肉溶接に接着接合を併用したあて板継手において、溶接止端部から発生する疲労き裂に対しては接着接合による疲労寿命の向上効果は得られないことを結果は示唆している。

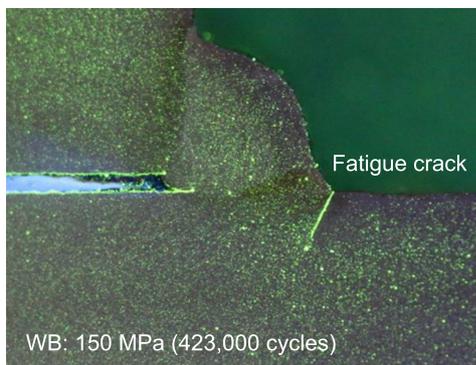


Fig. 5 Fatigue crack generated at weld toe.

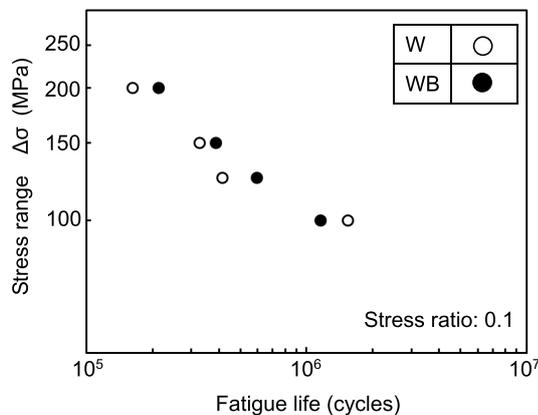


Fig. 6 Relationships between stress range and fatigue life of toe crack.

4. 弾性解析による溶接部近傍の応力分布の解明

4.1 解析モデル

溶接一接着供試体の溶接部近傍の応力分布特性を明らかにするため、溶接供試体および溶接一接着供試体の弾性解析を実施した。溶接一接着供試体を想定した弾性解析モデル (WB モデル) の概要を Fig. 7 に示す。

解析には汎用有限要素解析ソフト ABAQUS Ver. 6.13 の弾性解析を使用した。4 節点平面シェル要素を用い、平面ひずみ状態を仮定すると共に、対称性を考慮したハーフモデルを作成した。止端部およびルート部の応力集中の度合いを検討するため、止端部およびルート部近傍の要素寸法は十分小さく (0.05 mm × 0.05 mm) した^{9, 10)}。

鋼材のヤング率は 200 GPa、ポアソン比は 0.3 とした。溶接一接着供試体を想定した WB モデルについては、あて板の端部 15 mm の領域については接着剤の存在を考慮せず、厚さ 0.25 mm の空隙とした。あて板中央部の減厚領域には接着剤の存在を考慮すると共に、この領域の接着剤は溶接による熱影響を受けていないとし、Table 2 に示す常温時の機械的性質 (ヤング率: 3.8 GPa、ポアソン比: 0.35¹¹⁾) を使用した。鋼と接着剤は各節点で完全に結合されており、接着剤の破壊等は考慮していない。WB モデルの溶接ルート部近傍および接着剤の取り扱いについては、著者の実施した既往の研究においてもその妥当性を確認している¹²⁾。溶接供試体を想定した W モデルについては、WB モデルにおける接着剤の部分空隙とし、すべての部位を同じ機械的性質を有する鋼の弾性体とした。

疲労実験に使用した载荷ジグの寸法から、支点位置の節点の鉛直方向変位を拘束し、载荷位置の節点に鉛直方向に集中荷重を付与した。

4.2 解析モデルの妥当性検証

解析モデルの妥当性を検証するため、溶接供試体および溶接一接着供試体の幅方向の中央において、止端部から 5 mm 離れた位置の基板表面と、供試体の基板の左右両側面の溶接ルート部から基板の厚さ方向に 1 mm 離れた位置に貼り付けたひずみゲージにより、荷重を負荷したときのひずみの変化量を測定した。なお、ルート部近傍のひずみを

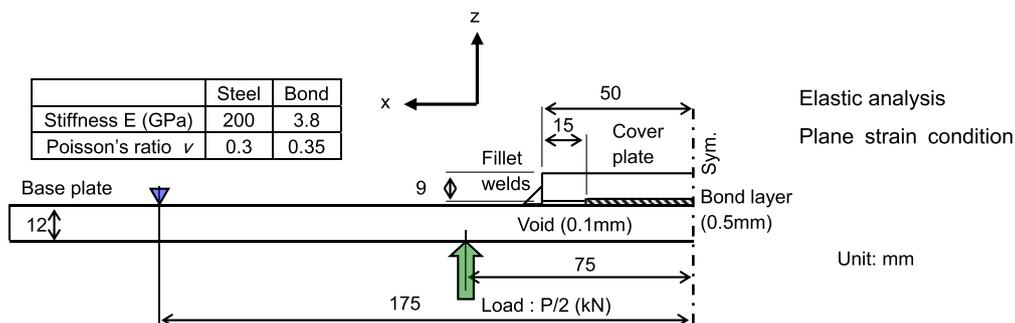


Fig. 7 Elastic analysis model (WB model).

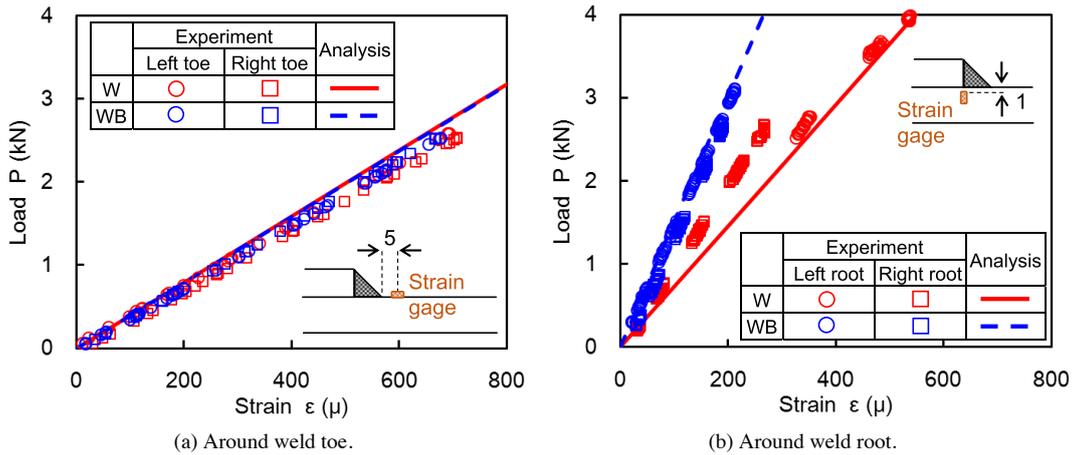


Fig. 8 Relationships between applied load and strain.

測定する際には、供試体の上下を反転させ、基板とあて板の間隙が開く方向に载荷し、基板の厚さ方向のひずみの変化量を測定した。

一方、解析により、実験供試体にひずみゲージを貼り付けた位置に相当する節点のひずみの変化量を求めた。実験および解析により得られた荷重とひずみの関係を Fig. 8 に示す。実験および解析結果のいずれにおいても、溶接供試体 (W モデル) および溶接—接着供試体 (WB モデル) の止端部近傍に発生するひずみの大きさはほぼ同じであった (Fig. 8 (a))。ルート部近傍については、溶接供試体 (W モデル) に比べ溶接—接着供試体 (WB モデル) の方が同じ大きさの荷重を与えた場合に発生するひずみが小さかった (Fig. 8 (b))。また、実験結果と解析結果は良く一致しており、作成した解析モデルの妥当性を確認することができた。

4.3 溶接部近傍の応力分布特性

等曲げ領域における基板の引張側の縁に作用する公称応力が 100 MPa になるように载荷した時の、各モデルの止端部近傍およびルート部近傍の応力分布を Fig. 9 および Fig. 10 に示す。止端部近傍 (Fig. 9) では継手の長さ (x) 方向の引張応力が主として生じており、ルート部近傍 (Fig. 10) では継手の高さ (z) 方向の圧縮応力が主に生じていた。よって、各応力成分と共に、止端部近傍については最大主応力、ルート部近傍については最小主応力の分布を示している。止端部近傍の最大主応力の方向は継手の長さ (x) 方向、ルート部近傍の最小主応力の方向は継手の高さ (z) 方向とほぼ一致していた。

止端部近傍 (Fig. 9) における W モデルと WB モデルの最大主応力の値を比較すると、W モデルに比べ WB モデルの方が約 15% 小さいが、いずれの場合も高い応力集中により公称応力の 4 倍以上の引張応力が生じている。このため、上述の疲労実験において、溶接供試体および溶接—接着供試体の溶接止端部からのき裂の発生および進展による疲労寿命がほぼ同じであったと判断できる。

一方、ルート部近傍 (Fig. 10) における W モデルと WB モ

デルの最小主応力の絶対値を比較すると、WB モデルのルート部に生じる圧縮応力は W モデルの場合の約 29% となっている。止端部に引張応力が作用するように曲げ荷重を负荷した場合、ルート部近傍における基板とあて板の間隙は閉口する方向に変形する。WB モデルでは接着剤がルート部から 15 mm 離れた位置に存在しており、接着剤がこの閉口を抑止するため、W モデルに比べ WB モデルのルート部近傍の圧縮応力が小さくなったものと考えられる。すなわち、溶接—接着供試体においては、止端部ではなく、ルート部に発生する応力を緩和する効果が高いと言える。よって、止端部ではなくルート部から発生する疲労き裂に対して、接着の併用による疲労寿命の向上効果が期待できると考えられる。

本研究で用いた供試体においてルート部から疲労き裂を発生させるには、ルート部近傍における基板とあて板の間隙を開口させる方向に変形を与えることが有効となる。そこで、W モデルおよび WB モデルに対し、载荷方向を上下反転させ同じ大きさの荷重を负荷した場合のルート部近傍の発生応力を確認した結果を Fig. 11 に示す。なお、応力は基板とあて板の間隙を開口させる方向の成分 (σ_z) のみ示している。ルート部近傍に発生する基板の厚さ方向 (間隙を開口させる方向) の応力は、W モデルに比べ、WB モデルの方が約 70% 小さかった。

5. 溶接と接着を併用したあて板継手のルートき裂に対する疲労寿命向上効果

5.1 実験方法

上述の解析結果から、あて板溶接継手における接着接合の併用は、溶接止端部よりもルート部に生じる応力を減少させる効果が高いことが分かった。そこで、ルート部から疲労き裂が発生する载荷条件で疲労実験を実施し、接着接合の併用による継手の疲労寿命向上効果の有無について検討した。

Fig. 3 に示すように止端部に引張応力が生じる 4 点曲げ載

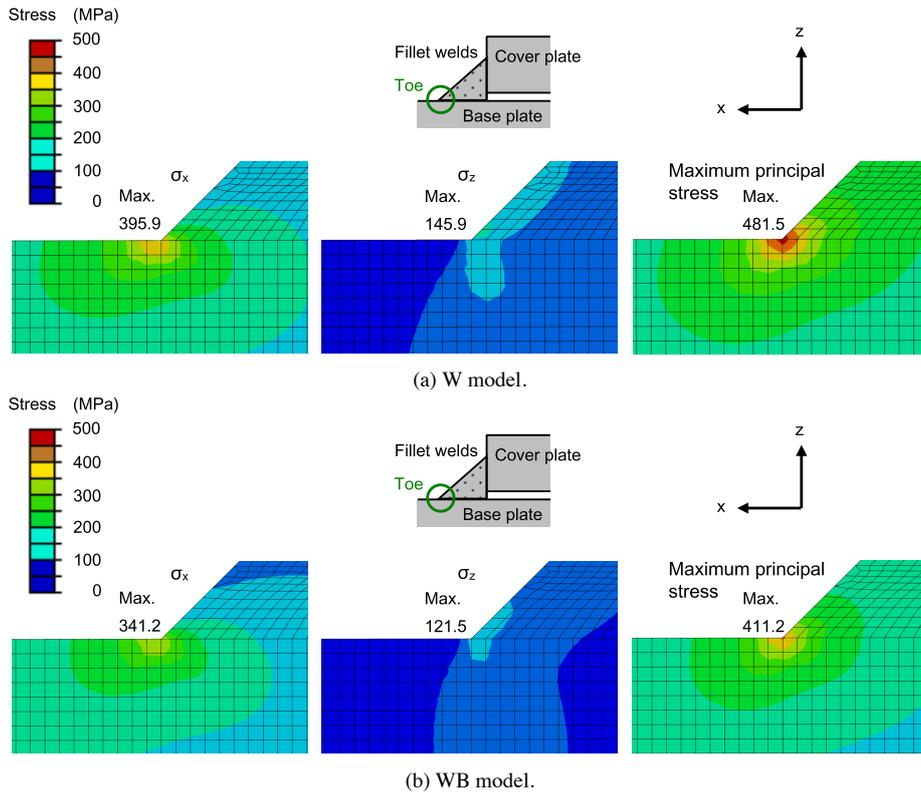


Fig. 9 Stress distribution around weld toe (applied nominal stress: 100 MPa).

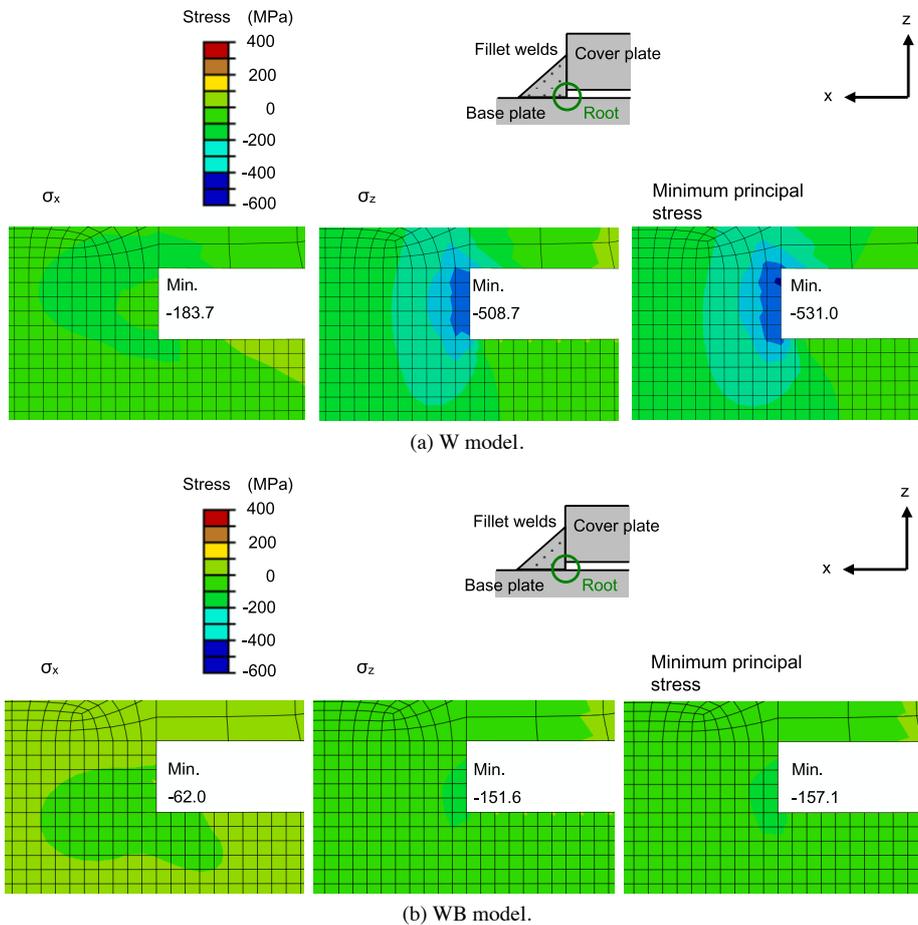


Fig. 10 Stress distribution around weld root (applied nominal stress: 100 MPa).

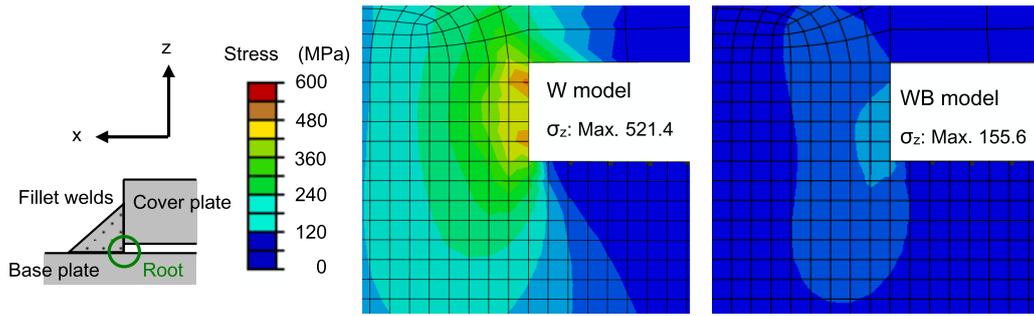


Fig. 11 Tensile stress in thickness direction around weld root (applied nominal stress: 100 MPa).

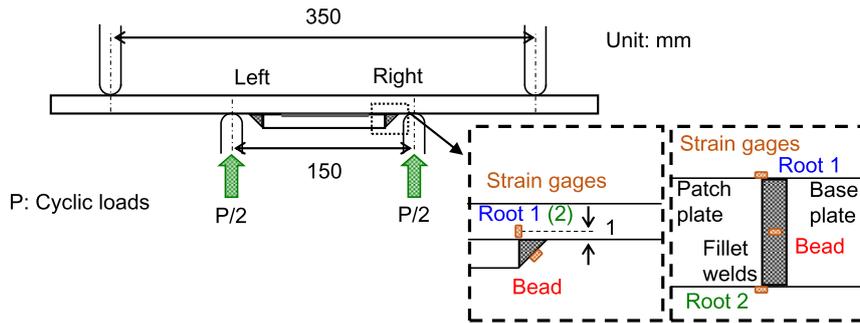


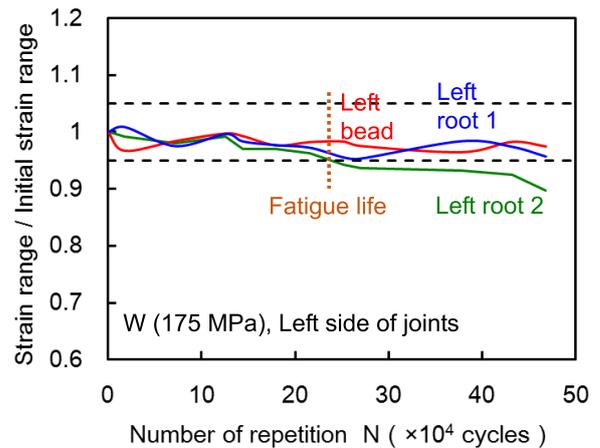
Fig. 12 Loading and supporting positions for generating cracks from weld root.

荷状態と反対向き，すなわち，止端部に圧縮応力が作用し，ルート部において基板とあて板の間隙が開く方向に力が作用するように供試体を設置した状態で2.と同様の疲労実験を実施した (Fig. 12).

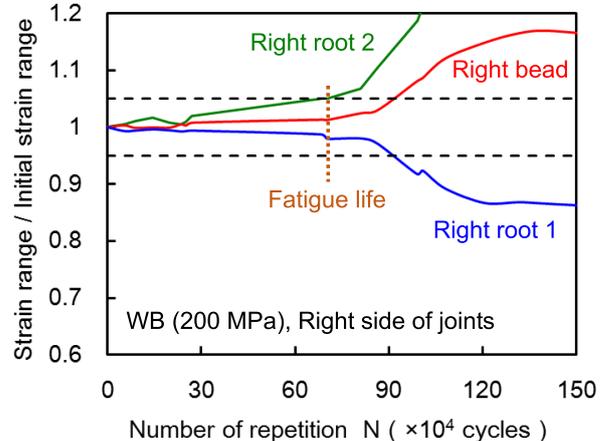
また，供試体の基板の左右両側面の溶接ルート部から基板の厚さ方向に1 mm離れた位置にひずみゲージを貼り付け，繰り返し载荷中の継手の高さ方向（基板とあて板の間隙が開く方向）のひずみ振幅を測定することで，ルート部からのき裂発生を検知することとした．一方，载荷ジグの寸法上，2.の実験の場合と同じ位置（供試体の幅方向の中央において止端部から5 mm離れた位置）にはひずみゲージが貼り付けられなかった．そのため，幅方向中央の溶接ビード上にひずみゲージを貼り付け，この位置のひずみ振幅の変化を測定することで供試体幅方向の中央部付近からの疲労き裂発生を検知することとした．ルート部における基板とあて板の間隙を起点として疲労き裂が発生，進展すると，ルート部の直下に貼り付けたひずみゲージにより測定されるひずみ振幅は減少する．逆に，ビード上に貼り付けたひずみゲージにより測定されるひずみ振幅は増加する．いずれの位置においても，ひずみ振幅が初期値から5%変化した時点疲労寿命とした．

5.2 実験結果

5.1に示す载荷条件で，溶接供試体および溶接—接着供試体それぞれ4体ずつを疲労実験に供した．ひずみ振幅の測定結果の例を Fig. 13 に示す．公称応力範囲 175 MPa の溶接供試体 (Fig. 13 (a)) は，供試体左側の溶接ルート部において，



(a) W specimen (nominal stress range: 175 MPa)



(b) WB specimen (nominal stress range: 200 MPa)

Fig. 13 Change of strain range around weld root.

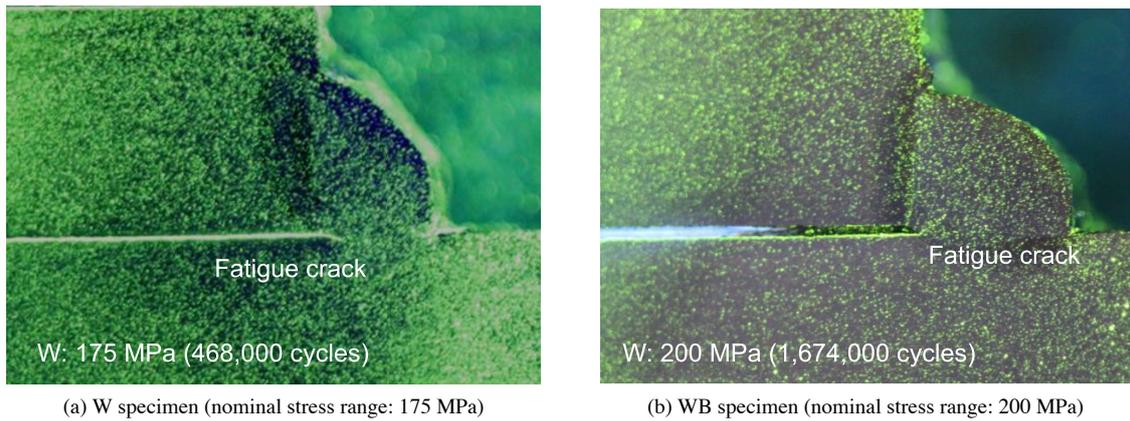


Fig. 14 Fatigue crack generated at weld root.

側面2に貼り付けたひずみゲージ (Left root 2) により測定されるひずみ振幅が減少した。すなわち、供試体左側の溶接ルート部における側面2の近傍から疲労き裂が発生したと推定される。

一方、公称応力範囲200 MPaの溶接—接着供試体 (Fig. 13 (b)) は、供試体右側の溶接ルート部において、側面2に貼り付けたひずみゲージ (Right root 2) と、右側の溶接ビード上に貼り付けたひずみゲージ (Right bead) により測定されるひずみ振幅が増加した。続いて、同じ溶接ルート部の側面1に貼り付けたひずみゲージ (Right root 1) により測定されるひずみ振幅が減少した。すなわち、疲労き裂は供試体の側面2ではなく、幅方向の中央付近から、比較的側面1に近い部位で発生したものと推察される。側面2の溶接ルート部近傍に貼り付けたひずみゲージ (Right root 2) によるひずみ振幅が増加した理由は、幅方向の中央付近から側面1の方にき裂が発生、進展することにより、側面2の方にひずみが集中したためと考えられる。幅35 mmの供試体の中でどの位置に最初に疲労き裂が発生したかを特定することは困難であり、疲労き裂の発生位置の違いにより疲労寿命には誤差が含まれるものと考えられる。よって、疲労寿命をより厳しく評価するため、貼り付けた全てのひずみゲージの内、いずれかのゲージのひずみ振幅の変化が5%に達した時点をも疲労寿命とした。

いずれにせよ、繰り返し荷回数増加に伴い、ルート部近傍あるいはビード上のひずみ振幅が徐々に変化する傾向が確認できた。ひずみ振幅が初期値から5%変化した後10~20万回程度の荷重を繰り返した。荷重終了後に供試体を切断し、断面に対して磁粉探傷試験を実施したところ、Fig. 14に示すように、溶接ルート部に疲労き裂が発生し、溶接金属内部にき裂が進展していることを確認した。

各供試体の作用公称応力範囲と疲労寿命の関係を Fig. 15に示す。図中の「*」の記号を添えた溶接—接着供試体 (WB) は、公称応力範囲150 MPaで220万回以上繰り返し荷重を負荷しても疲労き裂が発生しなかった。このため、公称応力範囲を225 MPaに上げて改めて実験に供した。

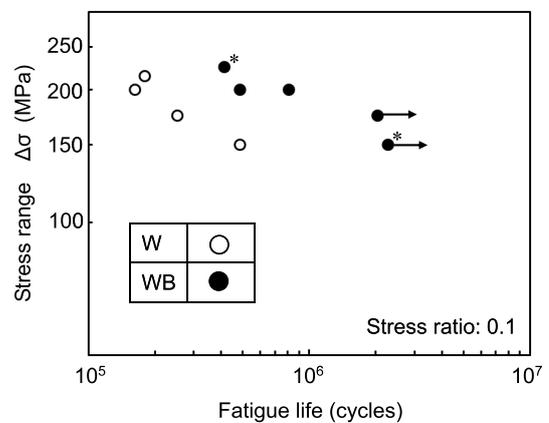


Fig. 15 Relationships between stress range and fatigue life of root crack.

本研究における疲労寿命の定義に限るが、作用公称応力範囲が比較的低い場合 (175 MPa 以下)、溶接—接着供試体の疲労寿命は溶接供試体の4~8倍以上となった。公称応力範囲が比較的高い場合 (200 MPa 以上) でも、溶接と接着の併用により2~3倍程度の疲労寿命向上効果が得られた。いずれにせよ、ルート部にき裂が発生する荷条件では、溶接供試体に比べ溶接—接着供試体の疲労寿命が大きく向上することが分かった。すなわち、すみ肉溶接に接着接合を併用したあて板継手において、溶接ルート部から疲労き裂が発生する荷条件に対しては接着接合による疲労寿命の向上効果が得られることを結果は示唆している。

実構造物では、プレートガーダー支承部におけるソールプレートの溶接ルート部から疲労き裂が発生する事例¹³⁾がある。このようなソールプレートの取り換えを行う場合に溶接と接着接合を併用することで、補修後の疲労寿命向上効果が得られる可能性があると考えられる。

6. 結 言

すみ肉溶接と接着接合を併用したあて板継手の応力分布特性を明らかにすると共に、接着接合の併用による継手の

疲労寿命の向上効果について検討するため、一連の実験および数値解析を実施した。

得られた主たる知見を以下に示す。

- (1) すみ肉溶接と接着接合を併用したあて板継手（溶接—接着供試体）およびすみ肉溶接のみで作製したあて板継手（溶接供試体）を4点曲げ疲労実験に供した。なお、溶接止端部から5mm離れた位置の基板表面に貼り付けたひずみゲージによるひずみ振幅の初期値からの変化が5%に達した時点を疲労寿命と定義した。溶接止端部に引張応力が作用し疲労き裂が発生する载荷条件では、溶接—接着供試体と溶接供試体の疲労寿命はほぼ同じであった。
- (2) 溶接—接着供試体および溶接供試体に対し、上述の4点曲げ载荷状態を想定した弾性解析シミュレーションを実施した。溶接—接着供試体を模擬したWBモデルおよび溶接供試体を模擬したWモデルのいずれにおいても、止端部には継手の長手方向に応力集中による高い引張応力が生じることを確認した。Wモデルに比べWBモデルの方が生じる応力は約15%小さかったが、いずれの場合も高い応力集中により公称応力の4倍以上の引張応力が生じていた。
- (3) WモデルとWBモデルを比較すると、WBモデルのルート部に生じる基板の厚さ方向の応力はWモデルの場合の約30%となっていた。溶接—接着供試体において接着剤が存在する領域はルート部に近く、ルート部に発生する応力を緩和する効果が高いことから、溶接—接着供試体の止端部ではなく、ルート部から発生する疲労き裂に対しては、接着の併用による疲労寿命の向上効果が期待できるものと推定した。
- (4) 溶接—接着供試体のルート部から疲労き裂を発生させるため、ルート部に引張応力が作用するように供試体を設置して4点曲げ疲労実験を実施した。溶接ルート部から基板の厚さ方向に1mm離れた位置と、幅方向中央の溶接ビード上に貼り付けたいずれかのひずみゲージによるひずみ振幅が初期値から5%変化した時点を疲労寿命と定義した。本研究における疲労寿命の定義に限るが、作用公称応力範囲が比較的低い場合（175MPa以下）、溶接—接着供試体の疲労寿命は溶接供試体の4~8倍以上となった。公称応力範囲が比較的高い場合（200MPa以上）でも、溶接と接着の併用により2~3倍程度の疲労寿命向上効果が得られた。
- (5) すみ肉溶接に接着接合を併用したあて板継手において、溶接ルート部から発生する疲労き裂に対しては接着接合による疲労寿命の向上効果が得られることを一連の結果は示唆していた。実構造物では、プレートガーダー支保部におけるソールプレートの溶接ルート部から疲労き裂が発生する事例がある。このようなソールプ

レートの取り換えを行う場合に溶接と接着接合を併用することで、補修後の疲労寿命向上効果が得られる可能性があると考えられる。

謝 辞

本研究の一部は、造船学術研究推進機構平成24年度研究助成を受けて実施した。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) NATORI T., NISHIKAWA K., MURAKOSHI J. and OHNO T.: Study on Characteristics of Corrosion Damages in Steel Bridge Members, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No. 668, I-54 (2001), 299-311 (in Japanese).
- 2) Japanese Society of Steel Construction: Fatigue Design Recommendations for Steel Structures, Giho-do (2012) (in Japanese).
- 3) CHEN X. and ITOH Y.: Minimum Thickness of Welding Patches to Recover Structural Performance of Steel Pipe Piles under Compression, Advanced Materials Research, 368-373 (2011), 1681-1685.
- 4) Japan Welding Society: 第2版 溶接・接合便覧 Maruzen (2003), 548-553 (in Japanese).
- 5) HIROHATA M.: Static Tensile Strength Characteristics of Fillet Welded Lap Joints Assisted with Bonding, Quarterly Journal of the JWS, Vol. 31, No. 4 (2013), 252-259 (in Japanese).
- 6) Japanese Industrial Standards Committee: Testing method for tensile properties of plastics JIS K 7113 (2002) (in Japanese).
- 7) Japanese Industrial Standards Committee: Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies, JIS K 6850 (2008) (in Japanese).
- 8) ISHIKAWA T., MATSUMOTO R., TSUTSUMI S. and KAWANO H.: Improvement of Fatigue Strength of Weld Root between U-shaped Rib and Deck Plate by Peening, 溶接構造シンポジウム2014講演論文集 (2014), 189-196 (in Japanese).
- 9) KAINUMA S., KUSUMOTO Y., HOSOMI N. and KIM I.-T.: Fatigue Behavior of Load-Carrying Fillet Welded Cruciform Joints with Plates of Different Thickness, Quarterly Journal of the JWS, Vol. 22, No. 4 (2004), 557-564 (in Japanese).
- 10) MORI T. and MYOKEN M.: Applicability of Effective Notch Stress Conception to Fatigue Strength Evaluation for Cruciform Welded joints Failing from Weld Root, Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A, Vol. 64, No. 1 (2009), 188-195 (in Japanese).
- 11) OKURA I., FUKUI T., NAKAMURA K. and MATSUGAMI T.: Decrease in Stress in Steel Plates by Carbon Fiber Sheets and Debonding Shearing Stress, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No. 689, I-57 (2001), 239-249 (in Japanese).
- 12) HIROHATA M.: Elastic Mechanical Behavior of Spliced Joints Assembled by Fillet Welding and Bonding, IIW Document No. XV-1469-14 (2014), International Institute of Welding.
- 13) TATEISHI K., NATORI T. and MIKI C.: Fatigue Damage of Shoes in Plate Girder Bridges and Improvement of Their Details, Journal of Japan Society of Civil Engineers, No. 489, I-27 (1994), 167-176 (in Japanese).