

カバープレーットの溶接ルート部における疲労き裂予防方法の提案

大阪大学 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 准教授 廣畑幹人

1. 緒言

近年、我が国において高度経済成長期に建設された橋梁の劣化や損傷が顕在化しており、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。橋梁の劣化や損傷の主な原因として、腐食による減厚や疲労き裂の発生および進展が挙げられる。腐食による減厚は部材の耐荷力および剛性を低下させると共に、部材破断を引き起こす場合がある。他方、疲労き裂の発生についても多数報告されている。一例として、図1に示すような、桁端支承部の下フランジとソールプレートのような、カバープレート構造において溶接止端部および溶接ルート部での疲労き裂の発生がある^{1,2)}。疲労き裂の発生原因として、下フランジとソールプレートとのギャップに起因する支承の機能不全が明らかにされている³⁾。このギャップの存在により下フランジとソールプレートの面的な荷重伝達が行われず、すみ肉溶接部に高い応力集中が生じる。このような下フランジとソールプレート周辺での疲労き裂の発生に対する根本的な解決策としてはソールプレートと支承の取り換えがあるが、施工難度およびコストが高くなることが課題とされている。

本研究では、カバープレート構造の溶接ルート部から発生するき裂を抑制するため、金属補修材を用い、溶接ルート部の疲労耐久性向上効果が得られるかを検討するために一連の検討を行った。

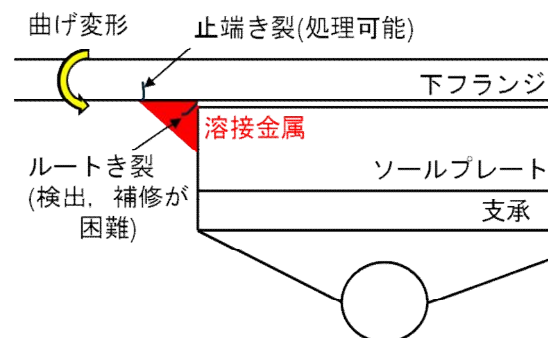


図1 溶接ルートき裂の発生機構

2. 実験供試体

実験供試体の形状および寸法を図2に示す。供試鋼材には板厚 9mm、幅 200mm、長さ 300mm の SM400A 鋼板（下フランジと称す）と、板厚 22mm、幅 200mm、長さ 120mm の SM400A 鋼板（ソールプレートと称す）を使用した。溶接材料は JIS T 49J 0 T1-0 C A-U を使用した。鋼板どうしを接着する金属補修材は高温用耐熱性パテ（旭エンジニアリング社製）を使用した。

図3に示すように、初めに下フランジに金属補修材を塗布し、硬化する前に金属補修材とソールプレートを接着した。下フランジとソールプレートで金属補修材を挟んだ状態で固定し、金属補修材の硬化をもって、接着完了とした。その後、下フランジとソールプレートの端部を

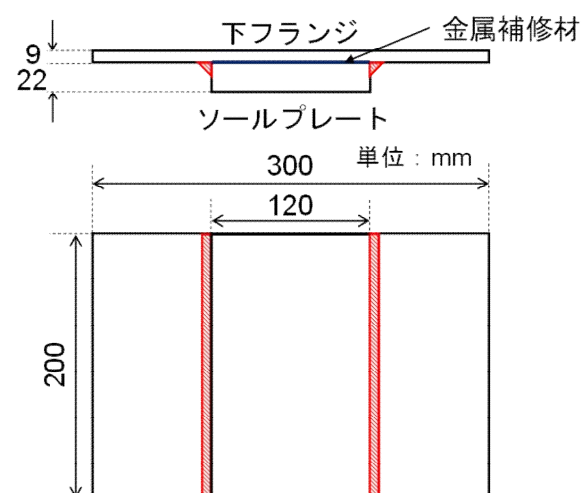


図2 実験供試体の形状および寸法

すみ肉溶接した。溶接のみで作製した供試体を W, 溶接と金属補修材の併用で作製した供試体を WA とする。すみ肉溶接による熱伝導の影響で金属補修材が使用温度 (260℃) 以上に達すると, 金属補修材の性能低下が生じる可能性がある。そこで, 溶接ビードに近い金属補修材が使用温度以上に到達しないように, 図 4 に示すように溶接ビードと金属補修材に離隔 $d=10\text{mm}$ を設けた。この離隔は二次元熱伝導理論に基づき設定した^{4,5)}。

3. 疲労実験

溶接後の供試体 WA と供試体 W を 40mm 幅に切り出し, 疲労実験用の供試体とした。図 5 に示すように, ルート部に開口変位を与える条件として 4 点曲げ载荷で実験を実施した。载荷中, 定期的に磁粉探傷を行い, 図 6 に示すような 0.2mm 以上のき裂を確認した時点を疲労寿命と定義した。応力比に対応する最小荷重と最大荷重の比を 0.1, 周波数を 5Hz として実験を行った。また, 繰返し数が 200 万回を超えても疲労き裂の発生が確認されなかった場合はその時点で実験を終了した。

実験を行った供試体の種類と疲労実験の結果をまとめ, 図 7 に示す。荷重範囲 3kN, 4kN および 5kN の条件で, 供試体 W よりも供試体 WA の方が疲労寿命が長くなる傾向が得られた。これより, 金属補修材で鋼板どうしを接着することによる, 溶接ルート部の疲労耐久性向上効果が確認された。疲労実験で用いた供試体 WA の金属補修材の厚さ h と離隔幅 d の計測箇所を図 8 に, 計測結果を表 1 に示す。なお, 疲労き裂が発生した箇所を赤字で示している。金属補修材の厚さ h が左右で異なっている供試体と, 比較的均一である供試体が存在することが確認できる。疲労き裂は, 金属補修材が厚い方の溶接ルート部から生じる傾向があることが読み取れる。また, 離隔幅 d に着目すると, 供試体 WA1 は離隔幅が長い方の溶接ルート部から, 供試体 WA3, WA4 は離隔幅が短い方の溶接ルート部から疲労き裂が発生していることが確認できた。

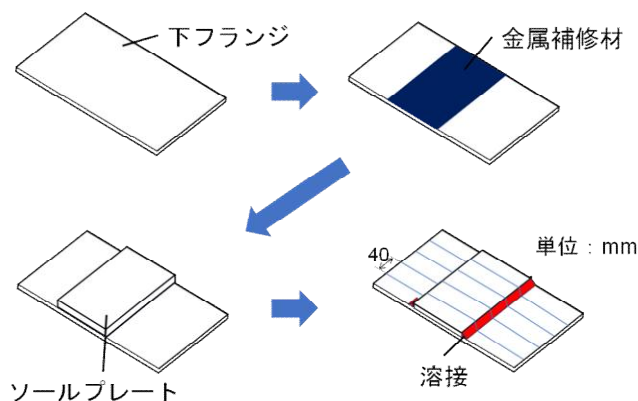


図3 実験供試体の作製順序

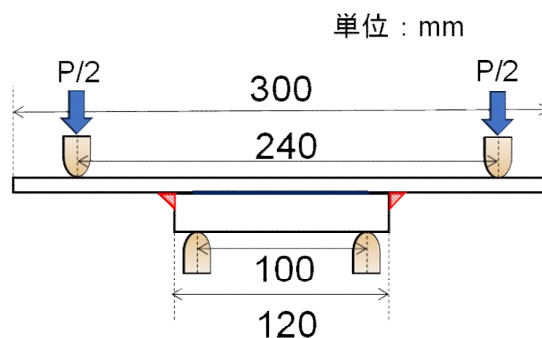


図5 疲労実験の载荷条件

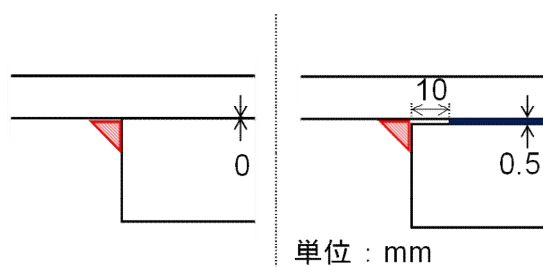


図4 溶接のみ(W)供試体と溶接接着(WA)供試体

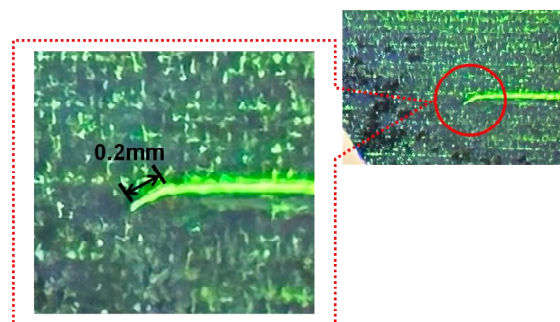


図6 疲労き裂の発生事例

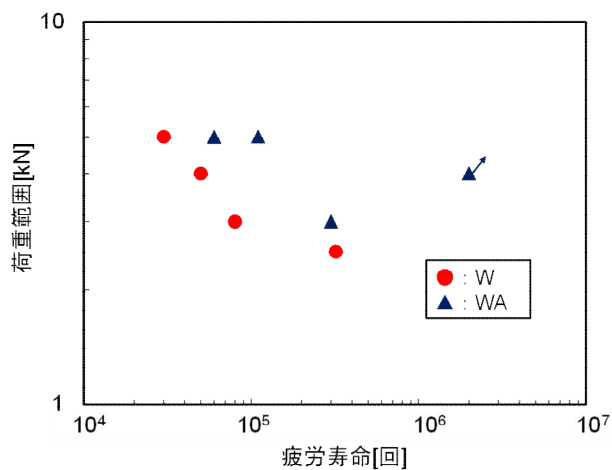
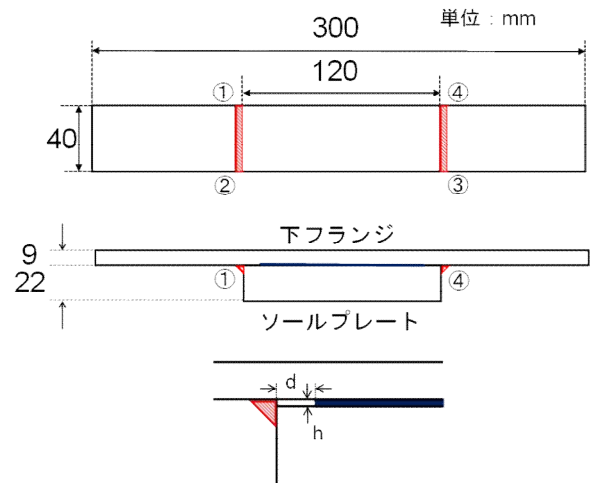


図 7 疲労実験結果

図 8 金属補修材の厚さ h と離隔幅 d の測定箇所表 1 金属補修材の厚さ h と離隔幅 d の測定結果

厚さ h (mm)	①	②	③	④	荷重範囲(kN)
WA1	1.44	1.22	1.28(11 万回)	1.44	5
WA2	1.37	1.14	1.35	1.14	4
WA3	0.71(6 万回)	0.82(6 万回)	0.27	0.22	5
WA4	0.54(50 万回)	0.70(30 万回)	0.27	0.27	3
離隔幅 d (mm)	①	②	③	④	荷重範囲(kN)
WA1	3.14	6.28	8.46(11 万回)	8.35	5
WA2	5.98	9.57	5.84	9.43	4
WA3	4.97(6 万回)	8.42(6 万回)	9.07	5.08	5
WA4	3.35(50 万回)	3.51(30 万回)	8.65	10.59	3

4. 弾性解析によるシミュレーション

金属補修材で鋼板どうしを接着することによる溶接ルート部の疲労耐久性向上効果に加え、金属補修材の厚さが溶接ルート部の疲労耐久性に与える影響について検討するため、弾性解析を用いたシミュレーションを行った。

解析モデルを図 9 に示す。対称性を考慮して、疲労実験供試体を 1/4 にモデル化し、3 次元弾性解析を実施した。汎用有限要素解析ソフト ABAQUS を使用し、8 節点ソリッド要素でモデルを作成した。ソールプレートと下フランジに相当する要素には弾性係数 200GPa、ポアソン比 0.3 を与えた。ソールプレートとフランジの間に厚さ 0.5mm の空隙を設けたモデル (W0.5 モデル) と、金属補修材による接着を想定し、ソールプレートと下フランジの間に厚さ 0.5mm および 1mm の金属補修材の層を設けたモデル (WA0.5 モデルおよび WA1.0 モデル) を構築した。金属補修材に相当する要素には弾性係数 5GPa、ポアソン比 0.3 を与えた⁶⁾。このモデルでは、金属補修材と鋼板が完全に付着していることを想定し、鋼板要素と金属補修材要素の節点を結合した。作用荷重は 3kN とした。

疲労耐久性の比較、評価には、き裂発生位置に作用する応力を用いることが望ましいが、溶接ルート部のような応力集中部では、要素の種類やメッシュのサイズによって値が大きく変化する。そこで、

開口部の相対変位を開口部の長さで除した値（以下、開口ひずみと称す）を用いて比較を行った。ルート部が開口することによって、溶接ルート部で疲労き裂が発生するため、開口ひずみが小さいほど、疲労耐久性が高くなると言える。開口変位（ひずみ）を算出するのに用いた節点を図 10 に赤い丸で示す。また、得られた開口ひずみを表 2 に示す。

W0.5 モデルに比べて WA0.5 モデルおよび WA1.0 モデルの開口ひずみは大きく抑制されていることが分かる。すなわち、金属補修材で鋼板どうしを接着することによる、溶接ルート部の疲労耐久性向上効果が確認できた。また、WA1.0 モデルよりも WA0.5 モデルの方が開口ひずみが小さく、金属補修材が薄いほど溶接ルート部の疲労耐久性向上効果が高くなる可能性が示唆された。しかし、金属補修材の厚さが減少することによる開口ひずみの減少はさほど大きくなく、溶接ルート部の疲労耐久性に与える影響は小さいと推察した。これより、本研究で行った疲労実験では、金属補修材の厚さの

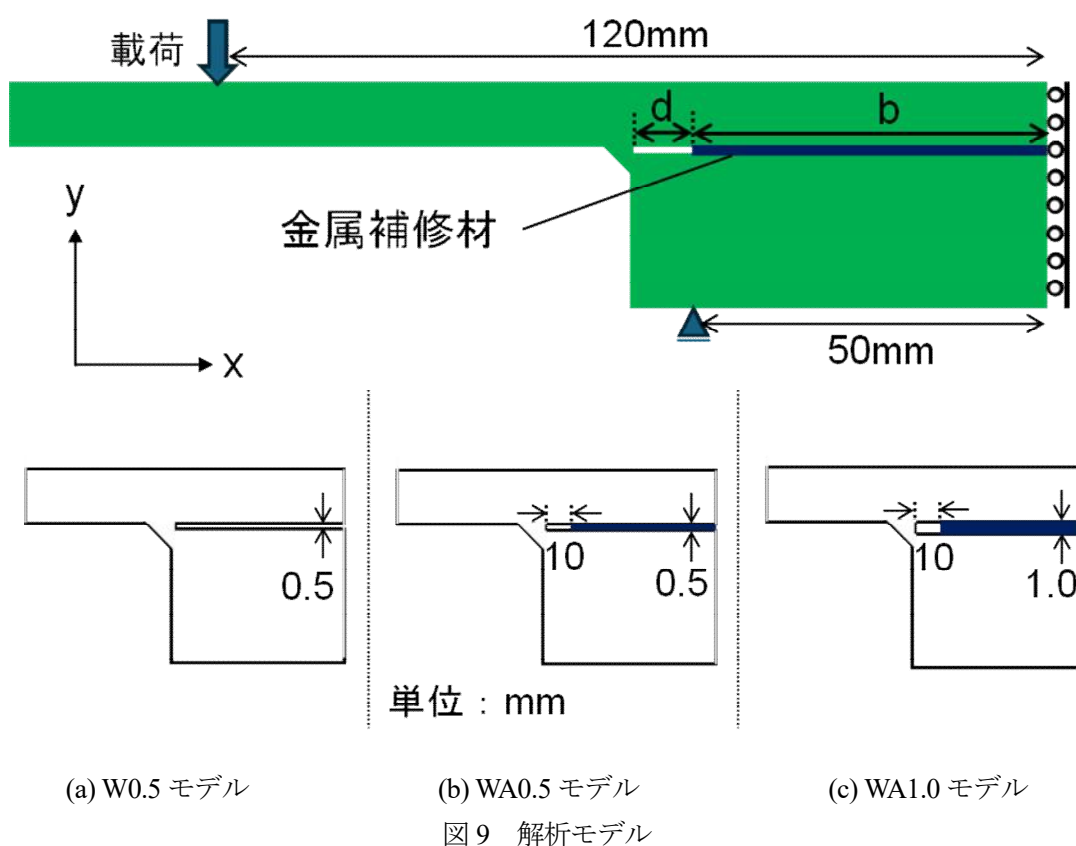


図 9 解析モデル

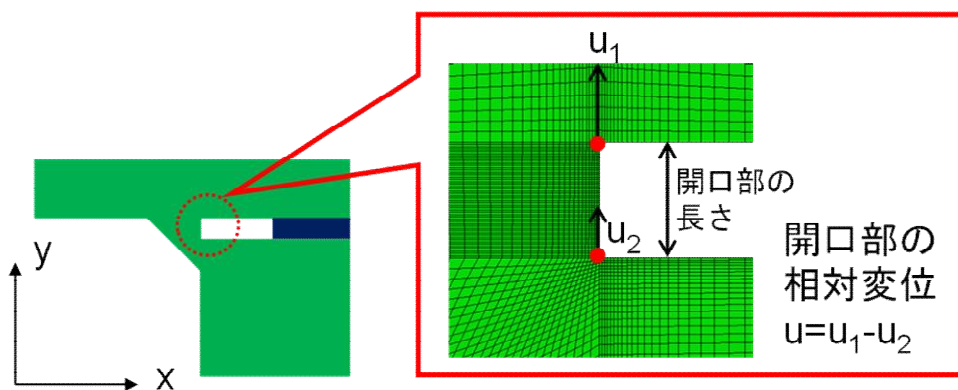


図 10 開口ひずみを算出するのに用いた節点

表 2 開口ひずみの比較

	W0.5 モデル	WA0.5 モデル	WA1.0 モデル
開口部の長さ(mm)	0.5	0.5	1.0
開口部の変位(mm)	2.7×10^{-2}	4.4×10^{-5}	1.0×10^{-4}
開口ひずみ	5.4×10^{-2}	8.8×10^{-5}	1.0×10^{-4}

不均一が影響し、金属補修材が薄い方の溶接ルート部から疲労き裂が発生したケースもあったと推察した。

また、供試体 WA1 と供試体 WA3 は荷重範囲が同じであるにも関わらず、供試体 WA3 の方が疲労寿命が短かった。金属補修材の厚さ h を比較すると、全体的な厚さは供試体 WA1 の方が厚いが、厚さの不均一は WA3 の方が大きいことが確認できる。このことから、金属補修材の厚さの不均一は溶接ルート部の疲労耐久性に与える影響が大きい可能性が示された。

5. 結言

本研究では、カバープレート構造の溶接ルート部から発生するき裂を抑制するため、金属補修材を用い、溶接ルート部の疲労耐久性向上効果が得られるかを検討するために一連の検討を行った。得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 供試体を作製する際に、金属補修材が使用温度以上に到達しないように、溶接ビードと金属補修材の間に離隔を設けた。本研究の範囲では、二次元熱伝導理論に基づきこの離隔を 10mm に設定した。
- (2) 溶接のみの供試体と金属補修材で接着した後に溶接した供試体の 2 種類で疲労実験を行った。荷重範囲 3kN, 4kN, 5kN の条件では、金属補修材で鋼板どうしを接着することにより、溶接ルート部の疲労耐久性が向上する効果が確認された。
- (3) 疲労実験の結果から、金属補修材の厚さおよび厚さの不均一が溶接ルート部の疲労耐久性に影響を与える可能性が示唆された。この可能性を検証するため、弾性解析によるシミュレーションを行った。溶接のみで鋼板間に厚さ 0.5mm の空隙を設けたモデル、接着を想定して鋼板間に厚さ 0.5mm および 1.0mm の金属補修材の層を設けたモデルの計 3 種類の比較から、金属補修材で鋼板どうしを接着することにより、溶接ルート部の開口ひずみが抑制される効果を確認した。また、金属補修材が薄いほど溶接ルート部の開口ひずみ抑制効果が高くなる傾向を確認した。しかし、金属補修材の厚さの影響は小さく、実験の範囲では厚さの不均一が溶接ルート部の疲労耐久性に大きな影響を与えると推察した。

6. 参考文献

- 1) 鋼構造委員会鋼橋の余寿命評価小委員会：鋼橋の劣化現象と損傷の評価，土木学会論文集，No.501, I-29, pp.21-36, 1994.
- 2) 丹羽雄一郎，松本健太郎，矢島秀治，小林裕介：鉄道合成桁ソールプレート溶接部の疲労対策，構造工学論文集，Vol.58A, pp.611-621, 2012.
- 3) 舘石和雄，名取暢，三木千寿：プレートガーダー支承部の疲労損傷とそのディテール改良に関する研究，土木学会論文集，No.489, I-27, pp.167-176, 1994.
- 4) 廣畑幹人：接着接合を併用した重ねすみ肉溶接継手の静的引張強度特性，溶接学会論文集，第

31 巻, 第 4 号, pp.252-259, 2013.

- 5) ADAMS, C M : Cooling Rates and Peak Temperatures in Fusion Welding, Welding Journal, Vol.37, No.5, pp.210-215, 1958.
- 6) 浅山英一 : プラスチック読本, pp.59-65, 1954.