

腐食鋼I桁構造の疲労特性

島袋 秀也¹・下里 哲弘²・有住 康則³・矢吹 哲矢⁴

¹琉球大学大学院理工学研究科博士課程前期（〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地）

²琉球大学工学部准教授（〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地）

³琉球大学工学部教授（〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地）

⁴琉球大学工学部名誉教授（〒903-0213 沖縄県西原町字千原1番地）

本研究では、実橋において腐食した鋼I桁を切り出して試験体を作成し、疲労試験結果から疲労特性の基礎的データを得ることを目的として検証を行った。試験体は4タイプで、下フランジとウェブに腐食部材を用いた試験体および下フランジとウェブの人工的な腐食破断モデルで亀裂が発生した。亀裂は下フランジの腐食孔や腐食破断モデルの未溶接と溶接の境界から発生し、き裂発生後は早い段階で下フランジおよびウェブ母材の破断にいたった。

1. はじめに

近年、疲労や重度の腐食による損傷事例が数多く報告されており、亀裂進展により脆性破壊を起こす危険性がある。写真1にアメリカで発生された鋼I桁の脆性破壊の例を示す。このように、疲労亀裂は条件によって、橋梁を破壊する大変危険な現象である。本研究では、実腐食した鋼I桁の疲労特性の基礎的データを得ることを目的とする。着目橋梁部位は桁端部とし、腐食劣化しやすく、且つ腐食劣化による耐荷力および疲労強度が低下すると橋全体の安定性に影響を与える部位である。

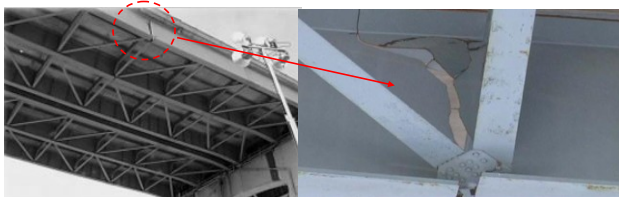


写真1 脆性破壊一例



写真2 実腐食使用部材

2. 試験方法

(1) 試験体

試験体は4タイプである。タイプAでは全ての下フランジとウェブに、タイプB及びCでは桁端部付近の下フランジ及びウェブに実橋において腐食した部材を切り出して用いている。タイプA及びBの下フランジとウェブは実橋で溶接された状態のままを保持して、タイプCでは下フランジとウェブの溶接補修を想定して腐食鋼板同士を溶接接合して製作されてある。タイプDはすべて新材で製作した試験体であり、下フランジとウェブは部分的に未溶接で製作し、実橋で多く発生する下フランジとウェブとの腐食破断をモデル化したものである。写真2に実腐食使用部材を示す。図1に上記4タイプの図面を示す。

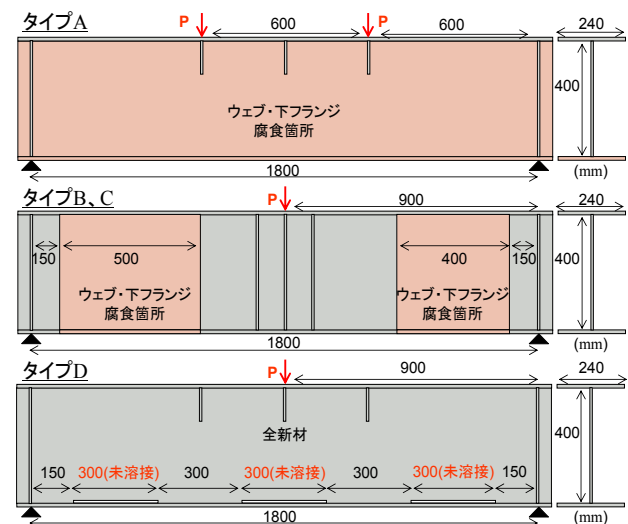


図1 試験体製作図面

(2) 腐食部材の残存板厚および腐食状況

写真3に各試験体の下フランジ腐食状況を示す。腐食下フランジの計測にはキャリパーゲージを使用した。計測は、軸方向100mm×幅方向20mm間隔で計測した。

図2に各試験体の下フランジおよびウェブ100mm範囲の残存減厚分布を示す。図より、タイプA試験体はフランジの片面のみが腐食している。これは腐食していない片面は外桁の外面部材であり、雨による付着塩分の洗浄効果によりほとんど腐食していない。もう片面はフランジエッジ部に向かって著しく減厚している。また、エッジ部は断面欠損も著しい。ウェブの腐食状態は実橋同様に下フランジ近傍で腐食する分布を有している。

タイプB試験体は、支点部付近の約500mmに腐食部材をはめ込んで溶接しており、その腐食部分の下フランジの腐食状態はタイプAと同様に、下フランジの片面のみ腐食しており、エッジ部に激しい腐食と断面欠損がある。ウェブの腐食状態はタイプA同様にウェブ近傍で腐食している分布を有している。タイプCは、支点部付近400mmの腐食箇所の一部設計板厚が大きい腐食部材を使用した。

(3) 荷重載荷方法

本実験では、200kN曲げ疲労試験機および1000kN疲労試験機を用いた。タイプA試験体は4点曲げで疲労試験を行い、その他の試験体は3点曲げで疲労試験を行った。支点条件は単純支持である。

疲労試験では腐食による影響でひずみ値にばらつきが発生することを考慮し、腐食していない部分で載荷位置に近いゲージをターゲットゲージとして、そのひずみ値から算出される応力範囲が約50MPa(約250 μ)になるように繰り返し荷重を決定した。なお、ターゲットゲージの応力範囲の計測は動ひずみ計を用いて行った。載荷周波数は2~4Hzとし、200万回までの疲労載荷を基本とした。

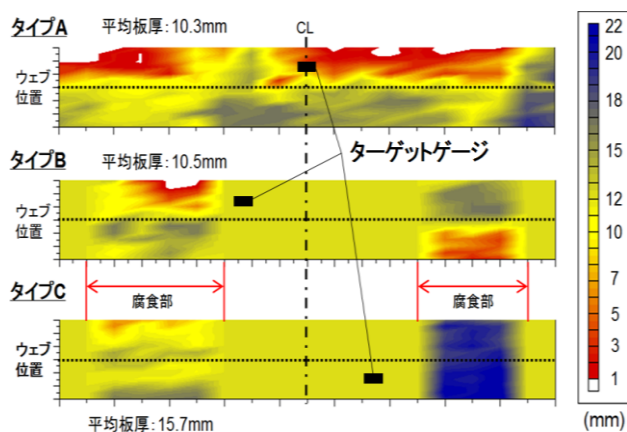


図2 下フランジ板厚分布

また、疲労試験中は磁粉探傷試験を行い、発生き裂の長さをモニタリングした。

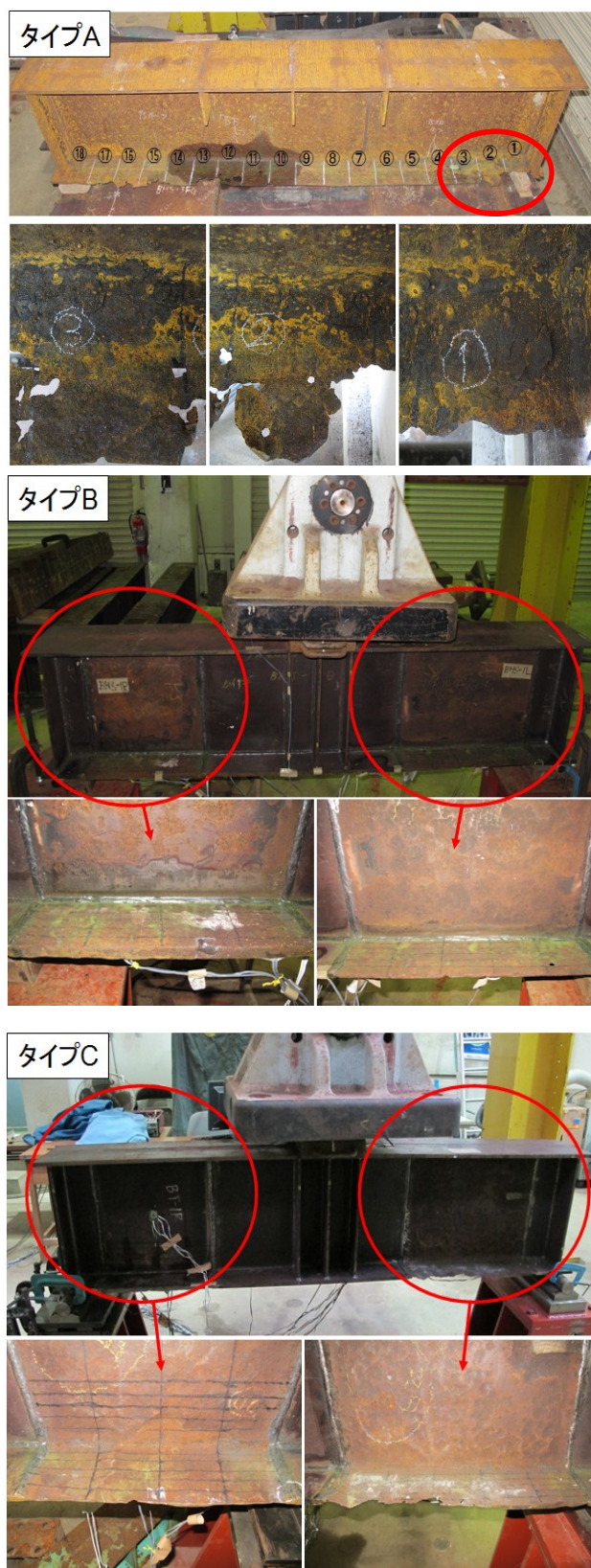


写真3 各試験体下フランジ腐食状況

3. 実験結果

(1) 疲労亀裂の発生状況

a) タイプA

表1にタイプAにおいて発生した疲労亀裂状況を示す。亀裂は7か所発生し、全て腐食下フランジに発生した。

亀裂1は約25万回という早い段階で発生した。き裂近傍の応力範囲は46MPaである。亀裂1の起点はフランジ幅のほぼ中央部に位置する腐食孔のフランジエッジ側から発生し、フランジエッジ方向に進展し、最後はフランジを破断した。進展方向はフランジ直角方向、つまり下フランジの直方向の直角方向であった。

亀裂2は約75万回で発生した。き裂近傍の応力範囲は46MPaである。亀裂2は亀裂1と同じ腐食孔のウェブ側を起点として発生し、約150万回でウェブと下フランジの溶接部に到達し、その後、ウェブ母材へ進展し、200万回終了後にはウェブ母材を破断した。進展方向はフランジ部はフランジ直角方向、ウェブ部でも曲げ応力に直角方向であった。

亀裂3は約75万回でフランジエッジ付近の断面欠損近傍の腐食孔から発生した。このき裂の進行はあまり早くなく、200万回で25mm程度であった。き裂近傍の応力範囲は46MPaである。

亀裂4は約75万回でフランジエッジの腐食でギザギザ状になった箇所から発生した。亀裂近傍の応力範囲は41.4MPaである。き裂はエッジ部からウェブ方向へ進行し、200万回で35mm程度の長さであった。

亀裂5は約75万回でフランジエッジ付近の断面欠損近傍の腐食孔から発生した。このき裂の進行はあまり早くなく、200万回で15mm程度であった。亀裂近傍の応力範囲は37.6MPaである。

亀裂6,7は腐食孔どうしが繋がるようなき裂であり、腐食孔間がき裂進展で繋がった後はき裂の進展はなく、ストップホール効果がみられた。写真4に亀裂No.1,2,5の一例を示す。

b) タイプB

表2にタイプBの疲労試験結果を示す。ターゲットゲージの応力範囲51.8MPaで200万回疲労载荷したが、腐食鋼板や腐食孔からの亀裂発生はなかった。腐食減厚量はタイプAに比べて少なく、腐食孔周辺も顕著なノッチがないことがき裂発生なしの理由として考えられる。

c) タイプC

表3にタイプCの疲労試験結果を示す。ターゲットゲージの応力範囲約51.8MPaで200万回疲労载荷したが、腐食鋼板や腐食孔からのき裂発生はなかった。こちらの腐食減厚量はタイプBよりも少なかったため、亀裂の発生はなかったと考えられる。

表1 亀裂発生状況(タイプA)

亀裂No	検出位置	25万回後 亀裂長さ	75万回後 亀裂長さ	150万回後 亀裂長さ	200万回後 亀裂長さ	試験終了後 亀裂長さ	近傍 振幅応力
1	⑪	10mm	17mm	45mm	60mm	-	46MPa
2	⑪	-	20mm	45mm	55mm	210mm	46MPa
3	⑫	-	15mm	18mm	25mm	25mm	46MPa
4	⑮	-	15mm	25mm	35mm	38mm	41.4MPa
5	④	-	7mm	10mm	15mm	15mm	37.6MPa
6	④	-	16mm	19mm	-	-	37.6MPa
7	④	-	7mm	15mm	-	-	37.6MPa

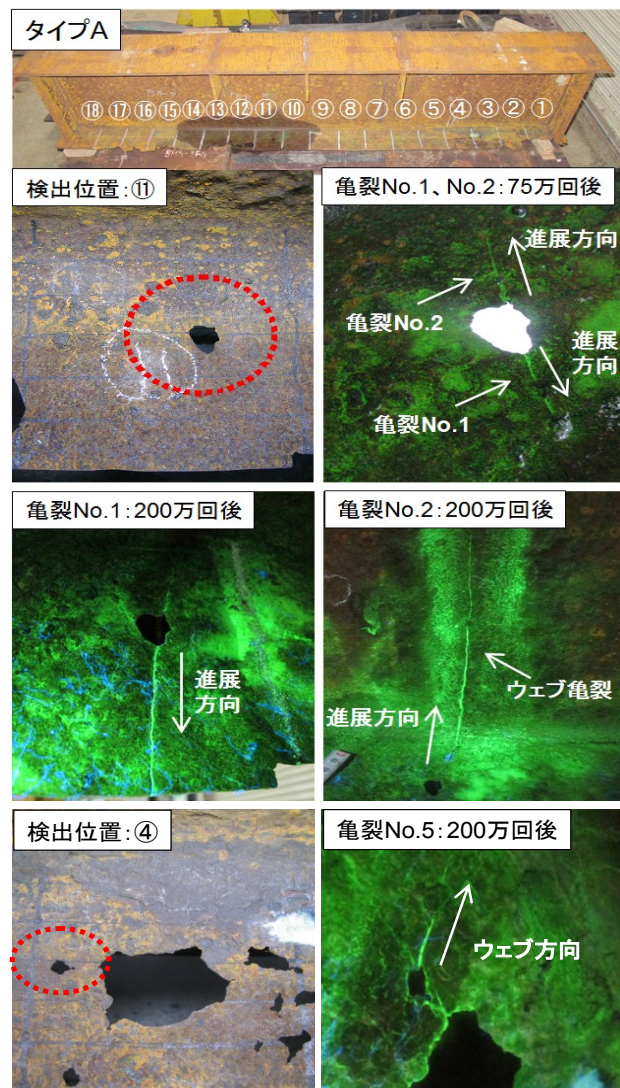


写真4 タイプA発生き裂一例

表2 き裂発生状況(タイプB)

亀裂No	検出位置	25万回後 亀裂長さ (mm)	50万回後 亀裂長さ (mm)	75万回後 亀裂長さ (mm)	100万回後 亀裂長さ (mm)	150万回後 亀裂長さ (mm)	200万回後 亀裂長さ (mm)	近傍振幅 応力
なし	なし	-	-	-	-	-	-	51.8MPa

表3 き裂発生状況(タイプC)

亀裂No	検出位置	25万回後 亀裂長さ (mm)	50万回後 亀裂長さ (mm)	75万回後 亀裂長さ (mm)	100万回後 亀裂長さ (mm)	150万回後 亀裂長さ (mm)	200万回後 亀裂長さ (mm)	近傍振幅 応力
なし	なし	-	-	-	-	-	-	51.8MPa

d) タイプD

表4にタイプDにおいて発生した疲労亀裂状況を示す。亀裂は4か所から発生した。写真5に亀裂発生例を示す。亀裂起点はいずれも桁端部の未溶接と溶接の境界からの発生で、亀裂No.1,2はウェブ母材方向に亀裂進展し、最大主応力と直角方向であった。そのき裂は徐々に進展し、曲げの中立軸付近まで進展すると停留した。亀裂No.3,4の発生部位は未溶接範囲の内、支点側の端部であり、亀裂進展方向は亀裂No.1,2とは逆方向で、進展方向は支点部方向であった。

(2) 疲労き裂進展性状

図3に亀裂進展性状を示す。腐食孔から亀裂が発生したタイプAはウェブに達した後、急激な亀裂進展が見られた。また、タイプDは桁の曲げ応力分布の特性から、引張応力場から圧縮応力場内まで進展した場合、亀裂は停留する。写真5に示す亀裂発生前の静的载荷試験による三軸応力計測結果より、亀裂進展方向は最小主応力の直角方向であった。よって、この亀裂は、溶接による引張残留応力場において圧縮応力の繰り返りで発生し、進行方向も最小主応力方向となり、引張残留応力域を超えるその域は圧縮応力場なので、亀裂は停留したと推定される。

表4 亀裂発生状況(タイプD)

亀裂No	検出位置	60万回後 亀裂長さ	100万回後 亀裂長さ	160万回後 亀裂長さ	200万回後 亀裂長さ	試験終了後 亀裂長さ	近傍 振幅応力
1	⑤	72mm	128mm	153mm	176mm	191mm	38.4MPa
2	②	65mm	90mm	105mm	117mm	133mm	38.4MPa
3	①	31mm	41mm	48mm	48mm	48mm	38.4MPa
4	⑥	-	20mm	32mm	44mm	44mm	38.4MPa



写真5 タイプD 発生亀裂一例

4. まとめ

亀裂は腐食孔から発生し、フランジ破断とウェブ母材の破断にいたる。なお、応力範囲は約 50MPa である。新材母材の 200 万回疲労強度(A 等級: 190MPa)、下フランジとウェブ溶接部の疲労強度(D 等級: 100MPa)より、かなり低めの応力範囲でも亀裂が発生する。亀裂はウェブに達すると急激な亀裂進展し、脆性破壊が発生する危険性があり、早期の対策を検討する必要がある。

下フランジとウェブの腐食破断により、その破断端部から亀裂が発生する可能性がある。また、その亀裂進展方向はウェブ母材の場合、進展方向は主応力方向に依存するほかに、溶接部の残留応力の影響を受ける。

今後、腐食鋼板を用いた桁疲労試験(残存疲労性状確認モデル)、腐食鋼板同士を溶接接合した疲労試験(溶接補修モデル)などの実験を行い、腐食した鋼I桁の疲労耐久性及び疲労性状の検証データを蓄積する必要がある。

謝辞: 本研究は、国土交通省道路政策の質の向上に資する新道路技術研究会議『鋼橋の腐食メカニズムの解明と耐久性診断に関する研究』を受けて行った。

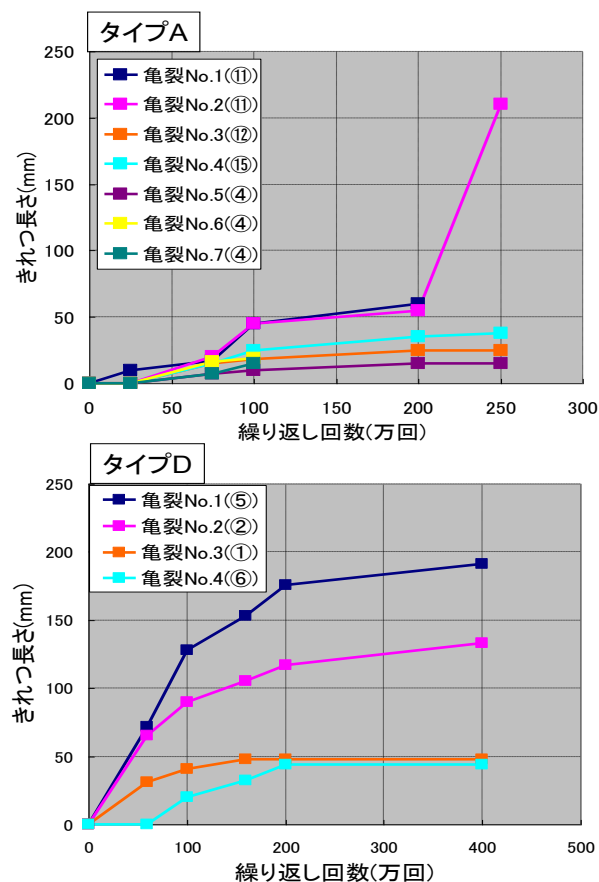


図3 亀裂進展性状