

CDスタッド溶接による疲労き裂の 簡易補修法に関する研究

近畿大学 工学部 建築学科 准教授 崎野 良比呂

概要：

ストップホールに代わる、CDスタッド溶接による疲労き裂の簡易補修法の効果を明らかにするため、基礎的な実験を行った。本提案手法により疲労き裂の進展停止もしくは大幅な遅延が出来れば、特殊な業者を呼ぶことなく点検者がその場で簡易補修を行う事ができるようになる。これにより本補修までの余裕が生まれるので、予算や人的資源に応じた戦略的維持管理に寄与することが出来る。

実験の結果、スタッド溶接をき裂前方に施工することにより、疲労進展が迂回し、これにより疲労き裂の進展を遅延させることが可能であること、より大きな径のスタッドをき裂の前方とき裂上に打つ施工方法が今回実験した中で最も効果が高いことが明らかになった。しかし、スタッドをき裂先端部に並べて溶接することはき裂進展を速めてしまう可能性があり効果的ではなかった。

キーワード：疲労き裂、き裂進展防止、スタッド溶接、簡易補修、ストップホール、隅肉溶接

1. 緒論

産業及び社会基盤を支えている鋼構造物は、わが国の大切な社会資本ストックである。わが国の高度成長期に建設された多くのこれら社会資本ストックが徐々に設計寿命を迎えつつあり、そのリメイクやメンテナンスがわが国の喫緊の課題となりつつある。特に、近年の交通量/重量の増加にともない、自動車専用道路の橋梁に予想を遙かに超えた数と長さのき裂が見つかり、鋼橋の架け替えもしくは補修・補強による疲労強度強化の重要性が広く認識されてきている。疲労対策として、き裂が発生しないように行う事前の対策、すなわち予防保全対策と、き裂が発生した後のき裂補修対策に大きく分けられる。予防保全対策には、当該個所の局所的な応力集中の緩和や残留応力を制御する方法、部材の追加などにより全体

的な発生応力を低減する方法がある。補修対策には、応急的な補修としてき裂の進展を遅延あるいは抑制する方法と、恒久的な補修として、き裂の進展を防止あるいはき裂を除去し、き裂によって不連続になった断面を補修・補強する方法がある¹⁻³⁾。

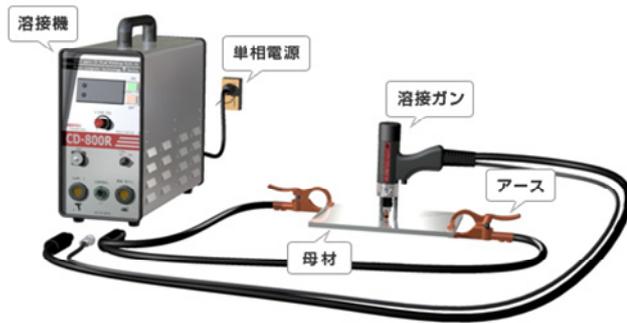
しかしながら、今後も増え続けて行くであろう疲労き裂に対して管理者が全て早急に対応して行くことには限界がある。そこで、見つけた疲労き裂を応急補修しておき、その後、緊急度、予算、人的資源に応じて戦略的に本格保守なり掛け替えを行っていくのが合理的であると考えられる。

この応急補修方法として、これまでは図1に示すストップホールが用いられてきた。しかしながらこの方法は、穴を空けるため断面欠損を新たに作ってしまい、耐力低下に繋がる危険が否定できない。ストップホールはき裂先端もしくはき裂が通るであろう位置に空ける必要があり、き裂の途中に空けても意味がないばかりか、かえって悪影響を及ぼす事もある。現場でき裂先端位置を正確に定めることは難しく、手間も掛かる。さらに、ストップホールを空けるには、誰でもが出来るというわけではなく、ある程度の機械と熟練が必要とされる。点検者が簡単に見つけ次第行えるというものではない。

そこで本研究では、CDスタッド溶接を用いた新たな疲労き裂の簡易補修法を提案し、その有効性について検討を行った。



図1 ストップホールによる応急補修⁴⁾

図2 スタッド溶接機の構成⁵⁾図3 施工されたスタッド⁶⁾

ストップホール工法



円孔を設ける代わりに
スタッドを打つ。

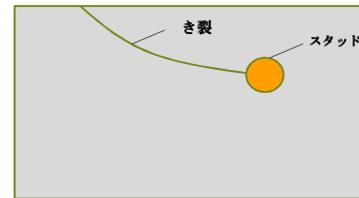
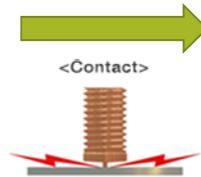


図4 スタッド溶接による応急補修の模式図

2. CDスタッド溶接による疲労き裂の簡易補修法

CDスタッド溶接は、図2に示す100V電源で作動する専用溶接機を専用ガンからなる。これらによる0.001秒から0.003秒の短時間の放電と圧接で確実に、かつ誰でも簡単に、図3に示すようにスタッドを施工することが出来る。専用溶接機は、研究代表者が使用しているもので15kg、他に市販されているもので5kg程度のももあり、可搬性に優れている。溶接ガンも軽量でハンドリングが容易に出来る。このスタッドをき裂先端もしくはき裂の上部に施工することにより、き裂の進展を停止もしくは大幅な遅延をさせることを試みる。この手法では、特殊な業者を呼ぶことなく点検者がその場で簡易補修を行う事ができるようになる。これにより本補修までの余裕が生まれるので、予算や人的資源に応じた戦略的維持管理に寄与することが出来る。

スタッド溶接による応急補修の模式図を図4に示す。裏に貫通していない表面き裂の先端にスタッド溶接を施工した場合、き裂が表面き裂から内部き裂となるので、応力拡大係数が大きく減少してき裂の進展を止める効果が期待できる。板厚貫通き裂の先端に施工した場合には、貫通き裂を片側のみ施工では表面き裂に、両面施工では内部き裂にする事ができるので同じく応力拡大係数が大きく減少してき裂の進展を止める効果が期待できる。き裂の先端ではなく、先端付近のき裂上に施工した場合でも、き裂の開口変位を小さくすることが出来るので、こ

れによっても効果が期待できる。き裂が短い場合、見つけることが確かなき裂の根本に施工しても効果が期待できる。少なくともスタッドを施工したことにより悪影響はないと考えられ、本補修時にはグラインダーにより取り除くことが出来る。また、あて板補修による本補修を行う場合には、あて板とナットで止めることにより、固定の一助となる事も期待できる。

3. パイロット試験

3.1 実験概要

まずは本手法の施工性や効果を簡易的に評価するため、平板に疲労き裂を生じさせた試験体でパイロット試験を行った。また、板厚によって効果が異なることが考えられるため、試験体の板厚をパラメータとした。試験体は、SM490、長さ500mm、板幅150mmのプレートを使用した。試験体は、試験体1(板厚4.5mm)、試験体2(板厚9mm)、試験体3(板厚12mm)の3種類を使用した。

準備段階の試験体を図5に示す。まず、試験体の中心に卓上ドリルで直径5mmの穴を空け、き裂が入ると予想される材軸直角方向に糸のこぎりで10mmほどの切れ目を入れた。その後、試験体の中心から15mmの位置にクラックゲージを貼付し、曲げ疲労試験に供した。疲労き裂が進展し、クラックゲージの値が1500(き裂長さ25mm)になるまで試験を行い、スタッドがない場合の疲労き裂進展速度を計測した。

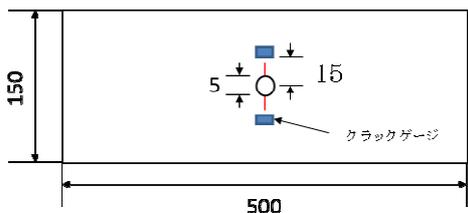


図5 準備段階の試験体

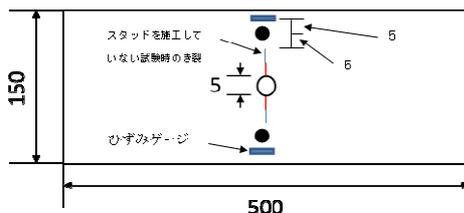


図6 スタッド施工後の試験体

その後、浸透探傷試験により、き裂先端を推測し、き裂先端から 5mmの位置が中心となるように 6mmのスタッドを施工した。また、き裂先端から 10mmの位置にひずみゲージを貼付した。スタッドを施工後の試験体を図6に示す。その後再び、曲げ疲労試験に供し、ひずみゲージが切れるまで(き裂長さ 35mm) 試験を行う事によりスタッドを施工した場合の進展速度を計測した。応力範囲はと周波数は、試験体1が $\Delta\sigma=300\text{MPa}\cdot 3\text{Hz}$ 、試験体2が $\Delta\sigma=200\text{MPa}\cdot 7.5\text{Hz}$ 、試験体3が $\Delta\sigma=200\text{MPa}\cdot 5\text{Hz}$ である。

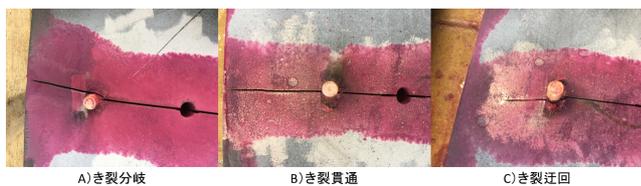


図7 スタッド溶接付近でのき裂の進展

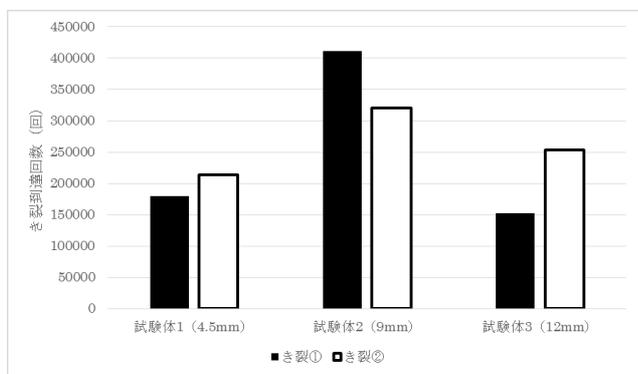


図8 スタッド施工前のき裂到達回数

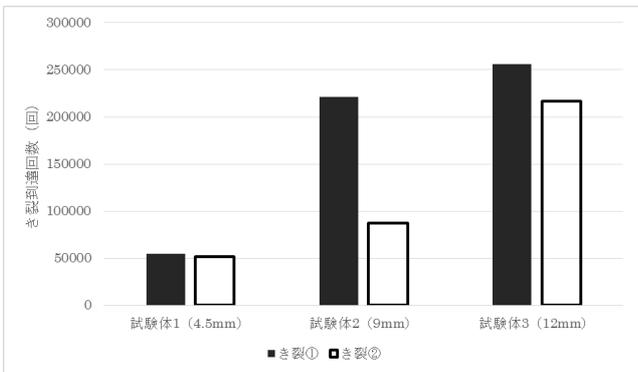


図9 スタッド施工後のき裂到達回数

3.2 実験結果

疲労き裂進展後の試験体の写真を図7に示す。スタッド溶接付近でのき裂の進展の違いが見られた。クラックゲージにより測定された、疲労き裂が試験体の中心から 20mmの位置から 10mm進展するまでの回数(スタッド施工前のき裂到達回数)を比較したものを図8に、スタッド施行後にき裂先端から再度 10mm進展するまでの回数(スタッド施工後のき裂到達回数)を比較したものを図9に示す。

試験体3(板厚 12mm)のき裂①は、スタッド施工前に比べて、スタッド施工後の方がき裂到達回数が約 1/2 になっている。き裂はスタッドを迂回して進展していた。しかし、き裂②は、スタッド施工後に比べてスタッド施工前の方がき裂等到達回数が若干多くなっている。き裂はスタッドを迂回して進展するのではなく、手前の方から、新しくき裂が発生していた。

試験体2(板厚 9mm)は、スタッド施工前のき裂到達回数がスタッド施工後に比べて約 1/2~1/4 となっている。また、き裂②のスタッド施工後のき裂到達回数が非常に少なかった。これは、スタッドを施工したが、スタッドの下を通っているため、き裂到達回数が少なかったと考えられる。

試験体1(板厚 4.5mm)は、板厚が薄いためスタッドの効果が一番大きくなると思っていた。しかし、スタッド施工前の方が、スタッド施工後に比べて約 1/3~1/4 の到達回数となっている。裏面を観察すると試験体1のみ裏まで疲労き裂が進展していた。試験体が 4.5mmと薄いため疲労試験に供した際に、裏面までき裂が入り、貫通き裂になってしまったため、スタッドが意味をなさなかったと考えられる。

スタッド施工前のき裂の到達回数とスタッド施工後のき裂到達回数はき裂長さが違うため、スタッドの効果があればスタッド施工後のき裂到達回数の方が少なくなる。試験体2と試験体3のスタッド施工後のき裂到達回数の方が大きくなっているもしくはほぼ同じき裂も見られた。よって、き裂が迂回するもしくは分岐する様に施工できれば本手法の効果は期待できると考えられる。

また、き裂付近へのスタッドの施工性に大きな問題は見られず、叩いてもとれることなく確実に施工できた。

4. 溶接試験体による効果確認試験

4.1 実験概要

試験体の形状・寸法を図 10 に示す。試験体は、板厚 9mm、板幅 150mm のベースプレートに 6mm のリブを 780 キロ鋼ソリッドワイヤで回し溶接したものである。ベースプレート、リブ共に HT780 を使用している。隅肉溶接の脚長は 6mm (実測 8mm) である。リブ回し溶接の溶接条件は、電流は 228A、電圧 24.2V、溶接速度は 180mm/min である。

(1) 初期き裂

この試験体に初期疲労き裂を入れるため、試験体をリブのある側が引張となるように 4 点曲げ疲労試験に供した。加力ピンの間隔は 450mm と 250mm である。実験時の写真を図 11 に示す。2ヶ所の回し溶接止端から左右に伸びる疲労き裂、計 4 本の長さが全て 20mm 以上となった段階で試験を中断し、浸透探傷試験によってき裂先端を推定した後にスタッドを施工した。

(2) スタッドの施工

試験体毎のスタッドの施工位置を図 12(a)～(c) に示す。試験体 1, 2 は、初期き裂の長かった②, ③の初期き裂の先端がスタッドの中心となるようにスタッドを施工した。試験体 3 は 4 本のき裂先端全てにスタッドを施工した。試験体 4 は、試験体 3 と比較するためスタッドを施工しなかった。全ての試験体で直径 6mm の軟鋼製スタッドを使用した。

(3) き裂進展実験

スタッドを施工した後、再度疲労試験に供し、き裂の進展をスタッドの有無により比較した。応力振幅は全て 100MPa である。進展の計測にはクラックゲージを用いた。2ヶ所の回し溶接止端部から伸びるき裂の一方が端部に届いて試験体が破断するまで加力を行った。もう一方の止端から伸びたき裂は、試験後再び浸透探傷試験を行い、進展状況を観察した。

4.2 実験結果

(1) 試験体 1, 試験体 2

試験体 1, 2 では、き裂が一定の長さになるまでの疲労回数を計測するため、クラックゲージを最もき裂進展が進んでいるき裂の先端より 5mm の位置に貼り、他のき裂のクラックゲージもこれと同じ位置に貼りつけた。よって、き裂先端からクラックゲージまでの距離がき裂毎に異なっている。

試験体 1 のき裂③, ④のクラックゲージデータは計測器不良で値が取れなかった。①, ②を比べるとスタッド溶接をした②き裂の方が、クラックゲージへのき裂の開始が 30 万回程度遅かった。最終的に①, ④のき裂が端部まで達して破断した。初期き裂が長い②, ③のき裂が端部まで達する前に短い①, ④のき裂が端部に達した事か

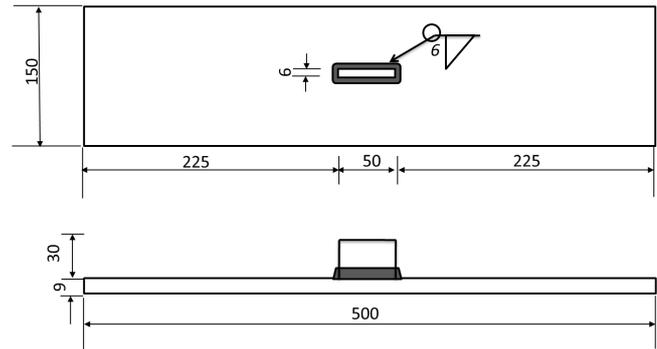


図 10 試験体の形状・寸法

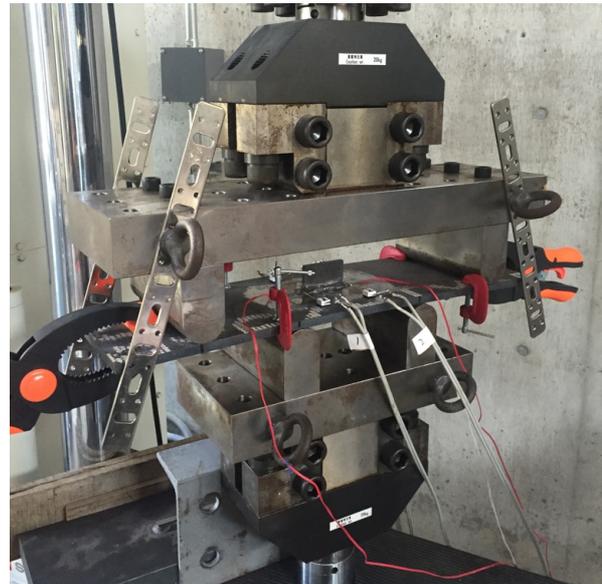
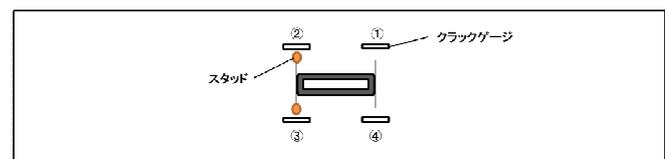
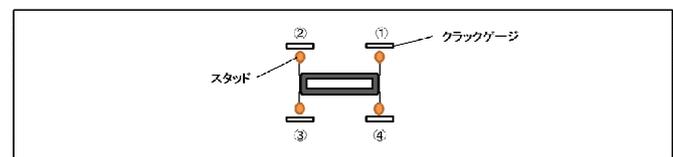


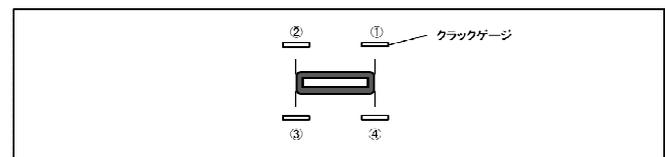
図 11 曲げ疲労試験



(a) 試験体 1.2 片側スタッド溶接



(b) 試験体 3 全箇所スタッド溶接



(c) 試験体 4 スタッド溶接なし

図 12 スタッドの施工位置の模式図

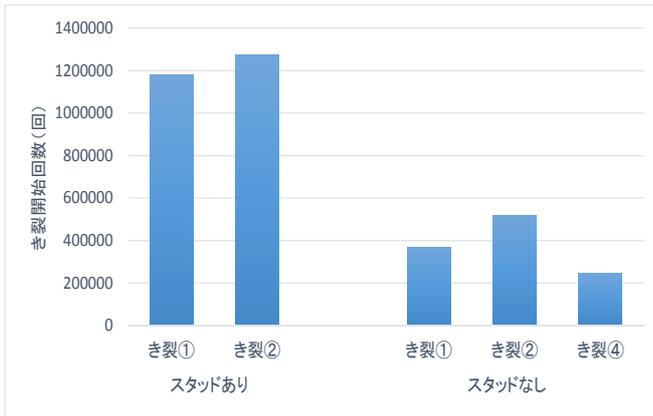


図13 クラックゲージに達するまでの繰返し回数の比較

らもスタッドによって疲労き裂が遅延されたと考えられる。

試験体2のスタッド溶接したき裂①, ②が試験体1に比べて1/3程度の繰返し回数でクラックゲージに達している。平均進展速度も試験体1に比べ早い。最終的にき裂①, ②側で破断した。破断時にはき裂①, ④はクラックゲージまで届いていなかった。これより、試験体2では、スタッドによるき裂遅延効果が確認できなかった。

(2) 試験体3, 試験体4

試験体3, 4では、試験体1, 2の結果やパイロット試験の結果を踏まえ、き裂先端から5mmの位置がスタッドの中心になるように施工した。また、クラックゲージの位置をそれぞれのき裂先端より10mmの位置とした。

試験体3, 4のクラックゲージに達するまで繰返し回数をスタッドの有無で比較したものを図13に示す。スタッドにより繰返し回数は約3倍になっており、本手法による疲労き裂の遅延効果が確認できたと考えられる。

5. スタッドの施工方法による効果の違い

5.1 実験概要

スタッドの径や打ち方を変えることによって効果が変わる可能性がある。そこで、より効果的な施工方法を探るための実験を行った。

試験体の形状・寸法は4章と同じである。

初めに他の試験体と比較をするためスタッドを溶接していない試験体(試験体0)を疲労試験機にかけてき裂進展速度をクラックゲージにより計測した。

スタッドを施工する試験体はまず、疲労試験機にかけてき裂を確認できた段階で試験を中断し、浸透探傷試験によってき裂先端位置を推定した後にスタッドを図14 A)~D)のように施工した。

試験体1は、4箇所全てき裂先端から5mmの位置に6mmのスタッドを施工した。試験体2は、試験体1と同じ条件でスタッドの直径を8mmに変えて施工した。試験体3

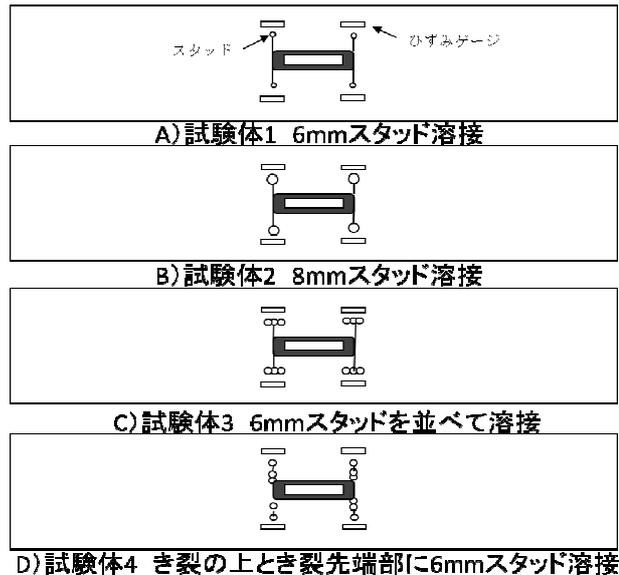


図14 スタッドの施工方法

は、試験体1と同様にき裂先端中心部に6mmのスタッドを溶接し、既往の実験でき裂がスタッドを回り込むことが分かっていたので、それを考慮し中心部に打ったき裂の両端に6mmのスタッドを並べて計3本施工した。試験体4は、試験体1と同様にき裂先から5mmの位置に6mmのスタッドを溶接し、さらに初期き裂の上に2本6mmのスタッドを施工した。

その後、全ての試験体に初期き裂の先端部から10mm離れた位置にひずみゲージを貼り、再度疲労試験にかけ、ひずみゲージの位置までき裂が進展する繰返し回数を比較した。応力範囲は全て200MPa、応力比 $R=0.1$ である。

5.2 実験結果

それぞれの試験体の実験結果を表1~5に示す。

試験体0と試験体1を比べると、ひずみゲージへのき裂到達回数、平均進展速度ともに、2倍以上の遅延効果があることがわかる。このことより6mmスタッドをき裂先端部に溶接することで疲労き裂進展の遅延効果があることが分かる。

次に、試験体0と試験体2を比べると、試験体2の方が試験体0よりも平均進展速度、ひずみゲージへのき裂到達回数ともに、2~3倍以上の遅延効果があることがわかる。このことから、8mmスタッド亀裂先端部に溶接することで遅延効果があることが分かる。

次に、試験体0と試験体3を比べると、試験体3のき裂2とき裂3はき裂がひずみゲージまで届く前に鋼材が折れてしまったため、データを取ることができなかった。結果を見ると試験体0より試験体3の方が到達回数が多くき裂進展遅延効果があることが分かる。

次に、試験体0と試験体4を比べると、試験体0より

表1.試験体0の実験結果

	クラックゲージへの き裂到達回数 (回)	平均進展速度 (mm /回)
き裂1	138660	7.21×10^{-5}
き裂2	129540	7.72×10^{-5}
き裂3	128700	7.77×10^{-5}
き裂4	142860	7.00×10^{-5}
平均	134940	7.43×10^{-5}

表2.試験体1の実験結果

	ひずみゲージへの き裂到達回数 (回)	平均進展速度 (mm /回)
き裂1	376200	2.66×10^{-5}
き裂2	280800	3.56×10^{-5}
き裂3	246600	4.06×10^{-5}
き裂4	368100	2.72×10^{-5}
平均	317925	3.25×10^{-5}

表3.試験体2の実験結果

	ひずみゲージへの き裂到達回数 (回)	平均進展速度 (mm /回)
き裂1	487800	2.05×10^{-5}
き裂2	436600	2.29×10^{-5}
き裂3	263700	3.79×10^{-5}
き裂4	285750	3.50×10^{-5}
平均	368212.5	2.91×10^{-5}

表4.試験体3の実験結果

	ひずみゲージへの き裂到達回数 (回)	平均進展速度 (mm /回)
き裂1	240750	4.15×10^{-5}
き裂2	275400以上	不明
き裂3	275400以上	不明
き裂4	191700	5.22×10^{-5}
平均	216225	4.69×10^{-5}

表5.試験体4の実験結果

	ひずみゲージへの き裂到達回数 (回)	平均進展速度 (mm /回)
き裂1	637200	1.57×10^{-5}
き裂2	763200	1.31×10^{-5}
き裂3	267300	3.74×10^{-5}
き裂4	220500	4.54×10^{-5}
平均	472050	2.79×10^{-5}

試験体4の方が遅延効果があることがわかる。き裂3とき裂4は、初期き裂が伸びきっていなかったため、初めにき裂1とき裂2だけにスタッドを溶接し疲労試験機にかけ、き裂3とき裂4は初期き裂が伸びきってから一度疲労試験機を止めて、スタッドを溶接した。その結果、き裂3とき裂4にはあまり効果が得られなかった。

図15は全ての試験体のひずみゲージへのき裂到達回数を試験体0をもとに無次元化して比較したものである。

試験体1と試験体2を比べると、試験体2の方が到達回数が遅くなっていることが分かる。このことからスタッドの直径が大きい方がき裂進展遅延効果があることが分かる。

試験体1と試験体3を比べると、スタッドを並べて施工すると、その部分に応力が集中してしまい、き裂先端部だけに溶接するよりも効果が悪くなっていることがわかる。これより、き裂がスタッドを回り込むからといってスタッドを横に並べて施工するだけでは、効果はなく、逆にき裂の進展を促進をしてしまうことがわかった。

試験体1と試験体4を比較すると、試験体4のようにスタッドをき裂の上に溶接するところにより、き裂先端部に溶接するだけよりも大きな遅延を行うことができた。

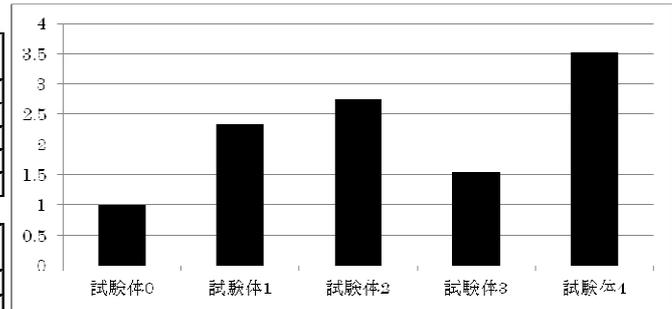


図15 クラックゲージに達するまでの繰返し回数の比較

6. 結論

本研究の実験条件で得られた結果は以下の通りである。

- 1) スタッド溶接をき裂前方に施工することにより、疲労が迂回する。これにより、疲労き裂の進展を遅延させることが可能である。
- 2) より直径の大きいスタッドを溶接することで進展の遅延効果は大きくなる。
- 3) スタッドをき裂先端部に並べて溶接することはき裂進展を速めてしまう可能性があり効果的ではない。
- 4) き裂の上にスタッド溶接を行うことは、き裂先端部の応力を分散させるので効果的である。

よって、直径の大きいスタッドを使いき裂の上にスタッドを打ちき裂先端の応力を分散させる方法が効果的でありこの方法を提案する。

今回の試験は、試験体数が少なく、スタッドの打つ位置により効果が得られない場合もあった。また、今回は応力振幅が大きい場合の実験のみ行ったが、実際に作用しているような応力振幅ではより効果が期待できると考えられる。今後、さらなる検討を続けていく予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、近畿大学工学部建築学科学部生、川田悠太君、佐竹拓磨君、斎藤拓也君、福田皓太君の協力を得た。ここに記して感謝致します。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造シリーズ2 2 構橋の疲労対策技術, 2013
- 2) 日本鋼構造協会：鋼橋の疲労耐久向上・長寿命化技術, 2006
- 3) 日本鋼構造協会：鋼構造物における長寿命化・延命化技術の現状と課題, 2009
- 4) <https://fujiengi.co.jp/works/repair/crack/>
- 5) <http://www.asiagiken.co.jp/faq.html>
- 6) <http://kamistud.co.jp/p02.html>