

道路政策の質の向上に資する技術研究開発

【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属		役職
	舘石和雄 (たていし かずお)	名古屋大学		教授
②研究 テーマ	名称	疲労き裂の補修技術に関する研究開発		
	政策 領域	[主領域] 8 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプI
		[副領域]		
③研究経費 (単位:万円) ※端数切り捨て。	平成24年度	平成25年度	平成26年度	総合計
	1,670	610	600	2,880
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏名	所属・役職 (※平成27年3月31日現在)			
判治 剛	名古屋大学・准教授			
石川 敏之	京都大学・助教			
清水 優	名古屋大学・助教			
⑤研究の目的・目標	(提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>鋼橋の疲労損傷はすでに各所で問題になっており、今後も問題が深刻化することが予想されることから、疲労き裂をできるだけ簡易に補修することのできる技術が望まれている。</p> <p>本研究は、比較的短い段階の疲労き裂に対する補修法として、ICR、樹脂注入法、溶接補修を取りあげ、それらを実用レベルに発展させることを目的とする。ICR は疲労き裂周辺に簡易なエアハンマーにより塑性変形を導入し、表面にてき裂を閉口させることでその進展を抑制するものである。樹脂注入法はき裂内部に樹脂を注入し、き裂の開閉口挙動を妨げることによってき裂の進展を抑制するものである。溶接補修はき裂を除去した後、溶接によって埋め戻す手法である。</p> <p>本研究では実験的、解析的検討により、これら 3 つの技術の適用可能範囲を明確にし、実用技術としての確立を目指す。</p>				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況

(研究の進捗や目的の達成状況、各研究者の役割・責任分担、本研究への貢献等(外注を実施している場合は、その役割等も含めて)について、必要に応じて組織図や図表等を用いながら、具体的かつ明確に記入下さい。)

ICR処理は、名大と京大で共同して実験、解析を実施した。また、国土交通省中部地方整備局の協力を得て、服部川大橋での施工試験も実施した。これらにより、ICR処理の適用限界が明らかになり、本研究成果の補修工法選定ガイドラインに盛り込むことができた。

樹脂注入法については名大が担当したが、次項で示すように、安定的な疲労強度改善効果を得ることが困難であったことから、途中から計画の見直しを行った。

溶接補修については名大で検討を行った。溶接作業を専門業者に外注し、溶接姿勢も考慮することで、現実に近い条件を再現した。解析的な検討を組み合わせることにより、溶接割れを防止できる条件を明らかにすることができ、当初の目的はほぼ達成することができた。

上記の成果を踏まえ、各種工法の適用限界、疲労寿命向上効果の評価法などに関する情報を盛り込んだ補修技術選定ガイドライン(案)を示すことができた。

⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況

(中間・FS評価における指摘事項を記載するとともに、その対応状況を簡潔に記入下さい。)

樹脂注入工法について、種々検討は行ったが、安定した疲労強度向上効果を得ることが難しいことを中間報告会において報告したところ、樹脂注入工法については研究目標を再考し、重点的に研究を進める領域を絞ったものに見直すべきとの指摘をいただいた。これを受けて、樹脂注入工法に関しては、当初計画よりも検討項目を減らし、その分を他の2工法の検討へと振り分けた。ただし、樹脂注入工法に対しても、主に解析的な検討を行うことにより、注入深さによって疲労強度向上効果が大きく影響を受けること、注入材料はある程度の剛性を有していれば十分なことなどを明らかにすることができたため、今後、そのような材料の発掘を行うことができれば、実用的な補修工法となる可能性がある。

③研究成果

(本研究で得られた知見、成果、学内外等へのインパクト等について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

本研究で対象とした ICR 処理，樹脂注入工法，溶接補修の 3 つの課題について，それぞれの工法別の成果は以下の通りである。

I. ICR 処理

ICR 処理に対する検討では，曲げおよび引張荷重下での疲労試験により，ICR 処理の効果に対する応力比，処理姿勢，処理時のき裂長や応力レベルの影響を検討した．これまで主に適用性が検討されてきた溶接止端から発生したき裂のみでなく，溶接ルートから主板へと進展したき裂に対しても適用できることを明らかにした．さらに有限要素解析から，き裂形状，主板厚，荷重条件などの因子が処理効果に与える影響を定量的に評価し，ICR 処理後の余寿命の推定方法を提案した．施工性や適用性を把握する目的で実橋梁への試験施工も行った．得られた主な結果を以下に記す．

- 1) X 線回折法により ICR 処理部周辺の残留応力を計測し，処理部近傍では降伏応力の 6~7 割程度の圧縮応力が導入されていることを示した．
- 2) 応力比 $R=-\infty\sim 0.5$ の範囲では，応力範囲が高くなると，主板裏面からき裂が発生しやすくなり， $120\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の場合，ICR 処理後の疲労寿命は溶接したままのそれと同程度となることを明らかにした．また応力範囲がそれよりも低い領域では，ICR 処理により疲労寿命が大幅に増加するが，その程度は応力比が高くなるにつれて低下することを明らかにした．
- 3) 溶接部から主板に進展し始めた段階のき裂に対しては，ICR 処理による効果はそれほど高くなかった．この原因の一つとして，き裂まわりの空間上の制約から，き裂先端を十分に処理できないことが考えられる．
- 4) 引張荷重下の場合であっても，平均応力もしくは最大応力が作用している状態で ICR 処理を施せば疲労寿命改善効果が得られるが，板曲げ荷重下での効果よりは低下することを明らかにした．

II. 樹脂注入法

面外ガセット溶接継手を対象として，繰返し圧縮荷重により発生した疲労き裂に対する樹脂注入法の効果を検討し，以下の成果を得た．

- 1) 圧縮荷重の繰返しにより溶接止端部に導入した疲労き裂に対して樹脂注入法を適用したが，樹脂の種類や注入向きによらず，き裂進展の明確な遅延はみられなかった．
- 2) 樹脂の注入向きによらず，き裂内への樹脂の浸透量は同程度であった．
- 3) き裂部に振動を加えながら樹脂を注入することにより，寿命改善効果が高くなる可能性が示された．

⑧研究成果（つづき）

- 4) 樹脂の弾性係数や浸透量の違いがき裂進展遅延効果に与える影響を有限要素解析により検討し、き裂深さに対して樹脂が100%充填されていれば、弾性係数が小さくてもある程度のき裂進展遅延効果は期待できること、また遅延効果は樹脂の浸透率に大きく依存することを明らかにした
- 5) 樹脂注入前後でのき裂近傍の応力の変化から、樹脂の浸透の程度を推定でき、それよりき裂進展速度の減少割合を予測できることを示した。

III. 溶接補修

繰返し変動荷重下で溶接施工試験を実施し、溶接割れの発生に影響を与える因子を明らかにした。さらに、熱弾塑性解析により、変動荷重下での溶接を再現し、得られた結果を基に、溶接割れ発生評価式を提案した。主な成果は以下の通りである。

- 1) ルートギャップ開口変位とその周波数が割れの発生に大きく影響し、開口変位や繰返し周波数が大きくなると割れが発生しやすくなることが明らかとなった。
- 2) ルートギャップ開口変位の初期値よりも、溶接中の開口変位を用いたほうが、割れ発生の境界をより明確にとらえることができることを明らかにした。
- 3) 熱弾塑性解析を用いて変動荷重下での溶接を再現できる方法を構築した。さらに、その解析法を用いて、溶接中のルートギャップ開口変位を推定する式を提案した。
- 4) 実験によって得られた割れ発生限界式と、解析によって求めた溶接中の開口変位の推定式を組み合わせることにより、変動荷重下での溶接における割れ発生評価式を提案した。これは、溶接前のルートギャップ開口変位、繰返し周波数、補修部の拘束度からなる式である。
- 5) 提案した評価式により、実験における割れ発生の有無を十分に判定できることを示した。

以上の個別課題に対する成果を基に、補修工法の選定フロー案を作成した。主な判断項目は以下の通りである。

- ① 発見したき裂が軽微の場合にはここで示す補修法の適用対象として工法の選定を行う。き裂が大きい場合（例えば貫通き裂など）には、他の補修法を考える。
- ② 対象としたき裂がICR処理の適用可能部位かどうかを確認する。
- ③ ICR処理が適用できるき裂の場合、き裂周辺の応力状態から、膜応力が支配的な場合は 100N/mm^2 以下、板曲げ応力が支配的な場合は 120N/mm^2 以下を適用範囲とする。
- ④ ICR処理の適用が難しいと判断された場合は、十分な作業スペースが確保できるときには溶接補修の適用を考える。狭隘な箇所からき裂が生じているときには、他の補修法を考える。
- ⑤ 溶接補修の適用を考える場合には、供用下での溶接の可否を判断し、溶接欠陥や低温割れ、高温割れの観点から、適用可能と判定されれば溶接補修を用いる。適用不可となった場合は、他の補修法を考える。

⑨研究成果の発表状況

(本研究の成果について、これまでに発表した代表的な論文、著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)、国際会議、学会等における発表状況を記入下さい。なお、学術誌へ投稿中の論文については、掲載が決定しているものに限りません。)

- 1) 長谷川吉男, 判治剛, 館石和雄 (2013) 繰返し荷重下における鋼橋の溶接補修に関する基礎的研究, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I, pp.701-702.
- 2) 鶴田義隆, 館石和雄, 判治剛, 笹田翔 (2013) 引張荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果, 第 68 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I, pp.1101-1102.
- 3) Hasegawa Y., Hanji T., Tateishi K. and Choi S.M. (2013) A study on weld repair of steel members under cyclic loading, Proc. of the 12th Japan-Korea Joint Symposium on Steel Bridges, CD-ROM.
- 4) Tateishi K., Hanji T., Tsuruta Y. Sasada S. and Choi S.M. (2013) Fatigue life extension of cracked welded joints by ICR treatment under tensile loading, Proc. of the 10th PSSC, pp.493-498.
- 5) 長谷川吉男, 判治剛, 館石和雄 (2014) 繰返し荷重下における溶接施工性に関する研究, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I, pp.899-900.
- 6) 服部真未子, 判治剛, 館石和雄 (2014) 樹脂注入による溶接継手の疲労き裂補修法に関する研究, 第 69 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I, pp.921-922.
- 7) 館石和雄, 判治剛, 石川敏之, 清水優 (2015) 引張または曲げ荷重を受ける溶接継手に対する ICR 処理の効果, 構造工学論文集, Vol.61A, pp.627-637.
- 8) Hattori M., Hanji T. and Tateishi K. (2015) Simple repair method for fatigue cracks in welded joints by resin injection, Proc. of the IABSE Conference Nara, CD-ROM.
- 9) 館石和雄, 判治剛, 清水優, 加瀬駿介 (2015) 桁試験体に生じた疲労き裂に対する ICR 処理による延命効果, 平成 27 年度溶接学会秋季大会概要集 (印刷中)
- 10) 加瀬駿介, 館石和雄, 判治剛, 清水優 (2015) 付加板が近接する溶接継手の疲労強度, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I (印刷中)
- 11) 清水優, 判治剛, 館石和雄, 鶴田義隆 (2015) ICR 処理を施した表面き裂の応力拡大係数の評価法, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I (印刷中)
- 12) 判治剛, 長谷川吉男, 館石和雄, 清水優 (2015) 繰返し荷重下での溶接補修における割れ発生評価法に関する研究, 第 70 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 部門 I (印刷中)
- 13) Hanji T., Hasegawa Y., Tateishi K. and Shimizu M. (2015) An Estimation Method for Weld Crack Initiation in Weld Repair under Cyclic Loading, Proc. of the 8th ISSS (in printing)

⑩研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

該当なし

⑪研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

ICR 処理に関しては、本研究により多くの知見が蓄積され、ICR 処理によって疲労寿命向上効果を期待できる条件が明確になった。今後、本研究によりとりまとめら補修技術ガイドライン案に従って、実橋への適用実績を蓄積し、その効果を実橋レベルにおいて確固たるものとしていくことが望まれる。

樹脂注入法については、本研究の範囲内では安定的な疲労強度向上効果を示すには至らなかったが、注入材料に対する要求品質を明らかにすることができた。今後は、適切な材料の発掘と、効果的な注入方法の開発が望まれる。実験技術に関していえば、樹脂の注入状況を非破壊的に計測・観察することのできる手法が開発されれば、効率的な検討を行うことができる。

溶接補修については、現在用いられている溶接材料、溶接法によって実験を行うことにより、1993 年以来用いられてきた溶接割れ発生条件を見直すことができた。今回の研究では鋼材成分などの影響は検討することができなかつたため、これについては過去の成果を準用することとして、補修技術ガイドライン案を示した。今後、ガイドライン案に沿って溶接補修の適用性を判断し、適用可能であると判断された場合には、実橋での適用実績を蓄積することが望まれる。また、実橋の継手での溶接補修を考えると、補修後の検査が困難な場合には、適用が制限されることが想定される。複雑な継手に対しても検査が行えるような検査技術の発展も課題である。

⑫研究成果の道路行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、道路政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

本研究で対象としたのは比較的短いき裂である。橋梁の近接点検が義務づけられたこともあり、実橋の溶接継手に比較的短いき裂が発見される可能性は、今後、ますます増加するものと考えられる。その対策を考える上で、補修技術ガイドライン案などの本研究成果は有用であると考えられる。

また、本研究で対象とした工法は、応急補修と恒久対策の中間に位置づけられるものであると考えている。すなわち、これらの技術を適切な条件下で適用すれば、当面の疲労き裂の進展を防止することができるものと期待される。本研究成果を実用的に用いることができれば、恒久対策を施すまでの時間的猶予を得ることができるだけでなく、対象橋梁に要求される耐用年数によっては恒久対策が不要となる場合も想定される。このように、補修・補強の優先順位付けに自由度が生まれ、合理的で弾力的な維持管理計画の策定を可能とする点で、道路政策へ反映することができる。

⑬自己評価

(研究目的の達成度、研究成果、今度の展望、道路政策の質の向上への寄与、研究費の投資価値についての自己評価及びその理由を簡潔に記入下さい。)

当初目標と比較して、達成できなかった項目は、樹脂注入法の実用化である。溶接継手に疲労き裂を導入し、それに樹脂を注入し、再び疲労き裂を進展させ、試験体の破断後に注入状況を確認するといった実験手順となることから、樹脂注入時には注入状況がわからず、時間と手間を要したことが一つの原因である。ICR処理については実験、解析により、これまでにない知見が得られ、今後の道路制作にも役立てていただける成果が得られたものと考えている。溶接補修に関する溶接割れ発生条件については、元来、非常に複雑な現象であり、すべてを網羅することは困難であるが、最も主要なパラメータである振動数と開口変位に着目し、溶接割れ発生条件式を見直すことができた点で、当初の目的は達成できたものと考えている。

研究費の投資価値は、今後、いかに多くの橋で本研究成果が活かされるかにかかっているものとする。関係各所の理解と協力をいただくとともに、積極的にPR活動を行って、適用実績を積み重ねていくことが必要である。