

鋼床版疲労き裂の検知手法の検証について

塚本 裕子

関東地方整備局 関東技術事務所 維持管理技術課 (〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1)

近年、大型車交通荷重の厳しい路線を中心にUリブを使用した鋼床版の疲労損傷事例が報告されている。鋼床版デッキプレートに発生するデッキ貫通型き裂は目視点検で発見できず、超音波探傷試験により調査する必要がある。デッキ貫通型き裂の検知手法として実用化されている2つの超音波探傷法について、実橋にて適用条件、操作性、き裂検出結果の相対比較、調査費用等の検証を行い、手引き等を作成することにより、橋梁の予防的修繕の一助となることを目的として検証した。

キーワード 鋼床版疲労き裂, 非破壊試験, 超音波探傷, 詳細調査

1. はじめに

国土交通省では、落橋をはじめとする事故等を未然に防止するため、「早期発見・早期対策」を行う予防保全システムを全国の道路橋へ展開することとし、有識者会議での審議を経て「道路橋の予防保全に向けた提言」が平成20年にとりまとめられた。その方策の一つに、道路橋の点検、診断、補修補強の各分野において、より良質かつより少ない負担で維持管理の実施を可能とする技術開発を国が中心となって推進することがあげられている。

橋梁の維持管理において、近年大型車交通条件の厳しい路線では、Uリブを使用した鋼床版の疲労損傷が発生している。疲労損傷の一つである鋼床版デッキプレートに発生するデッキ貫通型き裂は、Uリブ内面側からデッキプレート方向に発生・進展するため、目視点検では発見できず超音波探傷法が唯一の方法と考えられる(図-1,2)。しかし、超音波探傷法による探傷結果は、技術者の技量に左右されやすい。さらに客観性、信頼性の高い結果を得るためには、使用する探触子の選定や探傷法、探傷結果の評価方法について高い技術力等を有する技術者が必要である。

本検証では、目視点検が困難なデッキ貫通型き裂を対象とし、このき裂の検知手法として開発され、実用化さ

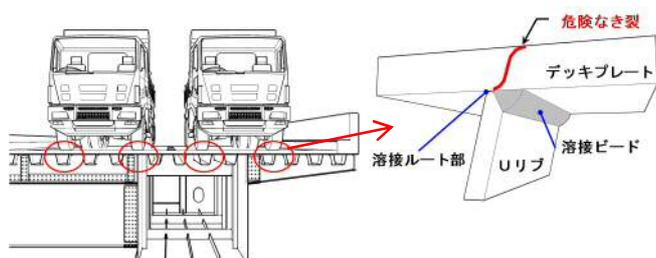


図-1 鋼床版Uリブ発生なき裂損傷

れている2つの超音波探傷法について、実橋にてその特性を検証した。また、今後の橋梁の維持管理に活用できるように検出目的に応じた検出性能、作業環境等から、これらの適用性を整理した。

2. 鋼床版Uリブのき裂損傷

鋼床版の大型車輪直下付近のUリブに発生する主なき裂損傷箇所として、Uリブとデッキプレートの溶接部、

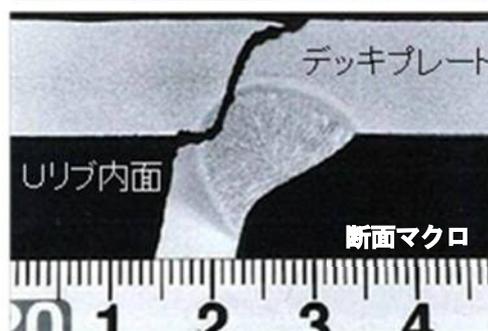


図-2 デッキ貫通型き裂¹⁾

Uリブ突合せ溶接部、Uリブと横リブの溶接部がある。さらにUリブとデッキプレートとの溶接部に発生するき裂損傷には、デッキ貫通型き裂とビード貫通型き裂があり、デッキ貫通型き裂はUリブ内面側からデッキプレート方向に発生・進展するため、目視点検では発見できず、第三者被害に直結する緊急性の高い損傷と位置づけられている。

3. デッキ貫通型き裂の検知手法

本検証で用いた「鋼床版き裂の超音波探傷法（鋼床版AUT）」と「半自動超音波探傷装置および探傷方法（鋼床版SAUT）」について説明する。

まず、鋼床版AUTは現国立研究開発法人土木研究所他

き裂を進展初期の段階で検知することを目的に開発された技術
(深さ3~6mmを検出)



磁石によりデッキ下面にスキャナと探触子を設置し、自動探傷を実施

開発: 国立研究開発法人土木研究所
菱電湘南エレクトロニクス(株)、三菱電機(株)

図-3 鋼床版き裂の超音波探傷法 (鋼床版AUT)

デッキ貫通の恐れのある危険なき裂を効率的に検知することを目的に
開発された技術(深さ6mm以上を検出)



デッキ下面にリアエンコーダを設置し、探触子をマニュアル操作することにより半自動探傷を実施

開発: 首都高速道路(株)
(一財)首都高速道路技術センター

図-4 半自動超音波探傷装置および探傷方法
(鋼床版SAUT)

で開発された方法であり、デッキプレート内に進展する深さ3mm程度以上の浅いき裂の検出に適しており、検査技術者の技量に左右されない超音波探傷法として、探触子の走査及び探傷データの記録を自動的に行う探傷法である(図-3)²⁾。

次に、鋼床版SAUTは首都高速道路株式会社他で開発された集束型の70度斜角探触子と専用の探傷治具を用いて、直射法により深さ6mm程度以上に進展したき裂を探傷する方法で探触子の走査を手動により行い、探傷データの記録を自動的に行う半自動探傷法である(図-4)³⁾。

4. 実橋検証の方法

大型車交通量の多い国道357号の鋼床版橋梁から、現地条件等を勘案し、舞浜大橋、千鳥大橋の2橋を選定し、図-5に示す作業条件(足場上、高所作業車等)毎に、両検知手法について検証作業を行い、一般的なマニュアル探傷法(MUT)も加えて特徴を整理した。



A: 吊足場上 B: 箱桁内脚立 C: 高所作業車(ゲッキタイ) D: 高所作業車(バケットタイプ)

図-5 実橋梁における作業条件

5. 実橋梁における検証

(1) 装置の操作性

a) 標準作業時間

実橋において、作業条件毎に鋼床版AUT、SAUTそれぞれの作業時間を計測した。

鋼床版AUTでは、き裂損傷の判定及びき裂長さ、深さの解析作業が、収集データを持ち帰っての内業となるので、探傷作業への時間的影響は少ない。しかし、レールや探傷装置の設置といった準備作業に時間がかかるため、鋼床版SAUTより作業所要時間は長くなる傾向にある。

これに対し、鋼床版SAUTは6mm以上のき裂損傷をスクリーニングした後、MUTによるき裂長さ、深さの詳細計測(計測データ処理は内業)を行うので、き裂の発生頻度が高い橋梁では、能率が低下することが考えられる。

また、鋼床版SAUTで必要となるMUTは技術者の技量が能率や結果に影響するが、鋼床版AUTは準備作業に若干時間がかかるが、熟練した探傷技術が必要ないため、探傷に要する時間は概ね変わらないと考えられる。

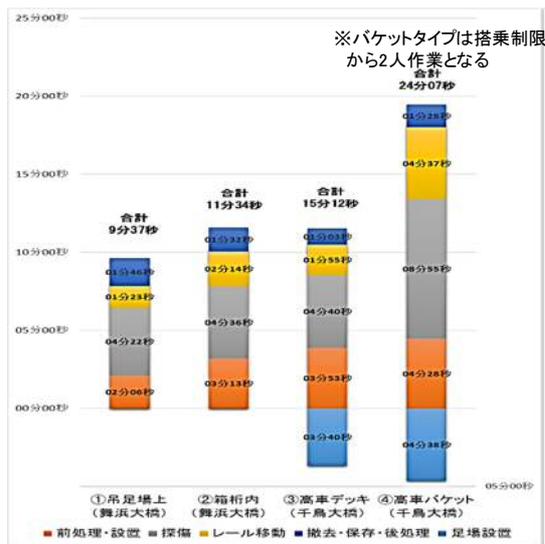


図-6 鋼床版AUTの1溶接線あたりの作業時間(例)

b) 結果

図-6は鋼床版AUTの作業条件別の1格間1溶接線の作業時間である。鋼床版AUTは装置の設置・操作を行う上で、3人での作業を標準としているが、バケットタイプ(2人乗)での調査も可能であることが分かった。ただし、作業効率はデッキタイプに比べ劣るので、選択可能であれば、デッキタイプの方が推奨できると考えられる。

(1格間は図-11参照)

(2) き裂検出結果の相対比較

a) 鋼床版AUT

検出した58箇所なき裂長さとき裂深さの関係を図-7に示す。鋼床版AUTは「Uリブ溶接線ルート部からデッキプレート方向に進展するき裂をより浅い段階で検知することを目的に開発された技術」であるため、き裂の深さ3mm程度の浅いき裂から検出できる特徴を有するが、鋼床版SAUTの検出結果と比較すると、深いき裂では8mm程度で頭打ちとなっている特徴がある。ただし、自動探傷により、き裂の連続的变化を捉えることができるため、き裂の先端や深い部分の特定は可能と考えられるとしている。

b) 鋼床版SAUT

鋼床版AUTと同一き裂を測定した鋼床版SAUTで検出した45箇所なき裂長さとき裂深さの関係を図-8に示す。鋼床版SAUTは「Uリブ溶接線ルート部からデッキプレート方向に進展するき裂に対して、6mm以上の深いき裂をより効率的に検知することを目的に開発された技術」であり、き裂深さ6mm以上のスクリーニング手法であるため、その特徴のとおり検出き裂深さの推定値は全て6mm以上となった。鋼床版AUTの検出結果と比較すると、6mm未満の比較的小さいき裂も抽出する可能性がある結果となった。

c) 結果

鋼床版AUTとSAUTの検出結果では、各々の仕様より

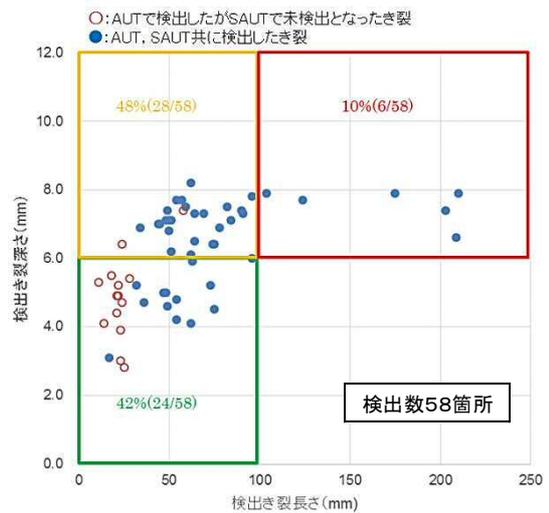


図-7 鋼床版AUTで検出したき裂長さ、深さの関係

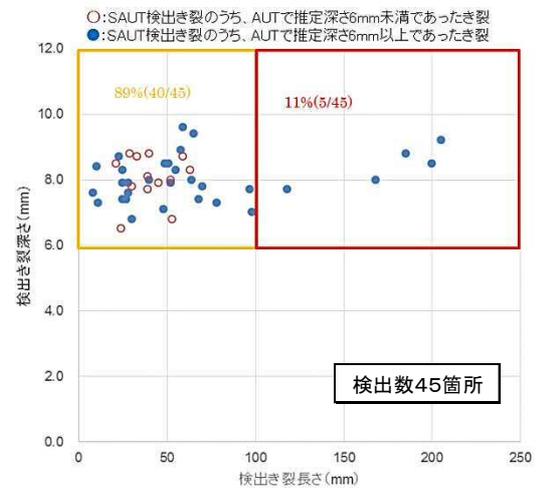


図-8 鋼床版SAUTで検出したき裂長さ、深さの関係

広い範囲で検出できることが分かった。また、き裂深さについてはそれぞればらつきがみられた。

このことを認識した上で、目的に応じて使用すべきと考えられる。

(3) 鋼床版AUTと鋼床版SAUTの比較

a) 比較結果

今回検証したUリブの59箇所なき裂に対し、鋼床版AUTでは58箇所、鋼床版SAUTでは45箇所なき裂を検出し、検出数に違いがみられた。鋼床版AUT、SAUTの両方で検出した44箇所なき裂長さの関係を図-9に、深さの関係を図-10に示す。

き裂長さについては、高い相関が得られているが、鋼床版AUTの方が鋼床版SAUTより18mm程度長くとらえている。これは鋼床版SAUTが深さ6mm以上にあるき裂の長さであるのに対し、鋼床版AUTがき裂長さ全体をとらえているからであると考えられる。

一方、参考程度であるが、き裂深さについては検出領域の違いにより相関が見られない結果となった。

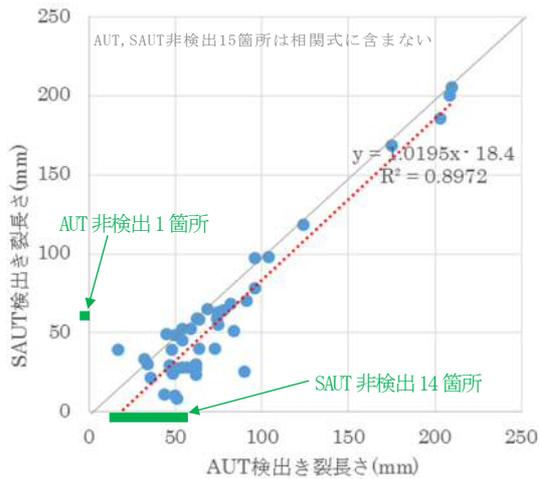


図-9 鋼床版AUT, SAUTで検出したき裂長さの比較

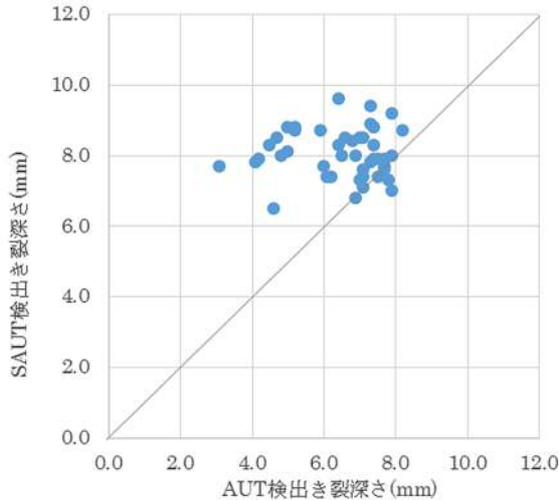


図-10 (参考)鋼床版AUT, SAUTで検出したき裂深さの比較

(4) 装置の記録性 (探傷不能条件)

今回の検証で、鋼床版AUT, SAUT共に探傷不能となる箇所が存在した。探傷不能条件を以下に示す。

a) 測定開始及び終了点 (横接近限界)

探触子ホルダを橋軸方向に移動させた時に、横リブへの接近限界があり、測定開始点及び終了点で探傷不能範囲が生じる(図-11)。この範囲は鋼床版AUTでは70mm, 鋼床版SAUTでは40mmであった。

b) デッキプレートの板継ぎ溶接部

探傷面に板継ぎ溶接部が存在し、溶接ビードの段差がある場合は、探触子ホルダを連続してスライドさせることができず、段差部分を回避するため、ビード幅+探触子設置幅が探傷不能範囲となる(図-12)。鋼床版AUTではビード幅+38mm, 鋼床版SAUTではビード幅+30mmがこの範囲となった。

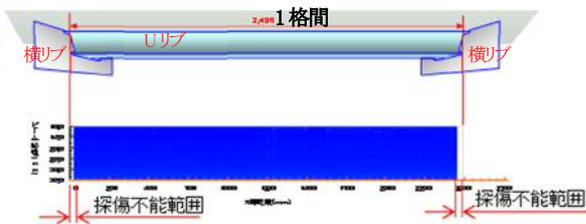


図-11 測定開始及び終了点での探傷不能範囲



図-12 デッキプレートの板継ぎ溶接部



図-13 ハンドホール (ダブルリングPL)

c) その他 (ハンドホール, 当板補強版, 添接板等の支障物等)

探傷子ホルダをスライドさせるスペースにハンドホールや添接板などの支障物がある場合には探傷不能となる(図-13)。

d) 結果

このような探傷不能範囲については、MUTにより、補助的な調査を行うことが望ましいと考えられる。

(5) 平成23年度鋼床版AUT調査結果との比較

a) 平成23年度と平成26年度との比較

実橋検証した舞浜大橋では千葉国道事務所が平成23年度にも鋼床版AUT調査を行っていたため、今回、同一調査手法である鋼床版AUT調査と比較し、き裂の進行程度を2ケースで確認した。調査箇所を図-14,17に示す。

第1径間U9リブは車線規制区間となっていたため、疲労損傷の要因となる車両の走行がなかった。図-15は第1径間U9リブのき裂長さを示しているが、傾きがほぼ1.0となり、き裂の進展は見られない結果となった。

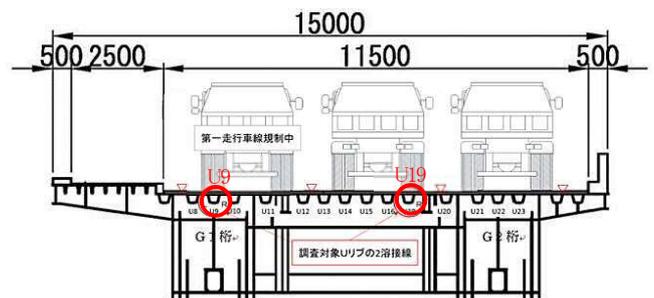


図-14 舞浜大橋 (海側) 断面図

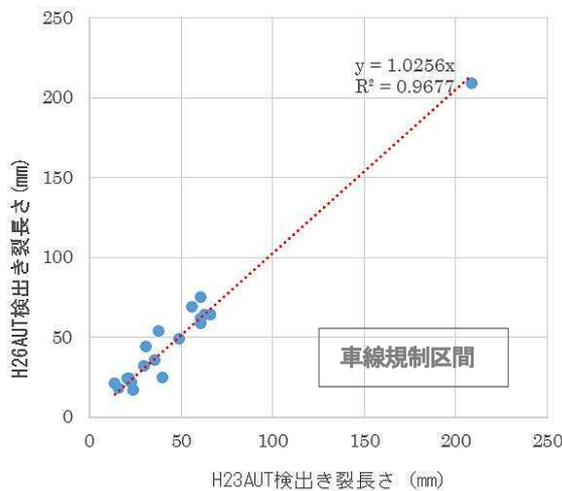


図-15 舞浜大橋（海側）第1径間U9リブのき裂長さ

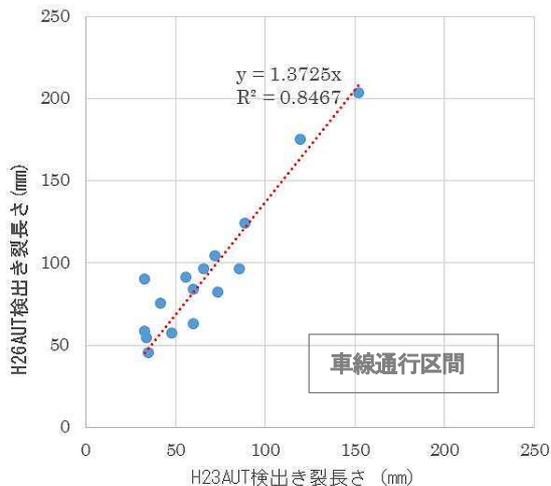


図-16 舞浜大橋（海側）第2径間U19リブのき裂長さ

一方、第2径間U19リブは大型車両の車輪直下付近にあり、繰り返し荷重を受けていた。図-16は第2径間U19リブのき裂長さを示しているが、傾きがほぼ1.4となり、き裂が進行していることが確認できる。

b) 結果

平成23年度調査との比較の結果、図-15のとおり鋼床版AUTのき裂検出性能は、前回と同様な結果を得ることができる再現性に優れている手法であることが分かった。

(6) MUTとの比較

吊足場上での条件で、各探傷法の所要時間を図-18に示す。鋼床版AUT、SAUTともに各探傷断面での全波形記録の保存が可能であり、MUTは対象物までの距離とエコーの強さを表示するだけなので、検証では一番非効率な結果となった。また、MUTを上向きの姿勢で連続して行うことは技術と体力が必要である。

6. 適用性の検討

今回調査した各検知手法の特徴を表-1に整理し、適用



図-17 舞浜大橋（海側）路面状況

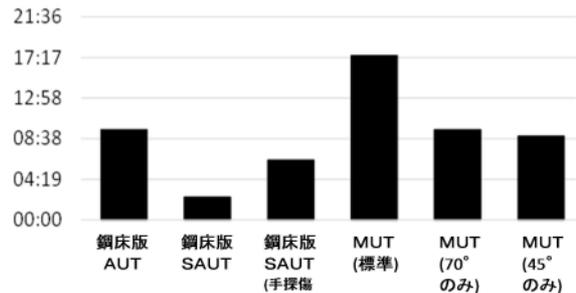


図-18 各探傷法の所要時間

性について検討した。

(1) 鋼床版AUTの適用性

浅いき裂の検出に優れているため、デッキ貫通型き裂を発生初期段階で検出することを目的とする調査方法として有効である。

また、本検出技術は目視困難なき裂において、技術者の技量に左右される超音波探傷試験でも検出結果の再現性が高いことから、き裂進展度を追跡する調査としても有効と考えられる。ただし、鋼床版SAUTに比較すると通常作業に3名を要し、作業時間も長くなるため、調査に係るコストは比較的高いものとなる。

(2) 鋼床版SAUTの適用性

き裂検出深さ6mm以上であるため、貫通き裂の恐れのある危険な損傷を検出することを目的としたスクリーニング調査方法として有効である。

また、浅いき裂を検出できないため、浅いき裂の進展の可能性を考慮して、定期的に調査を行うことが望まし

表-1 各探傷技術の特徴

検証項目	鋼床版AUT	鋼床版SAUT	MUT
技術者の作業時の標準構成	3人 主任1, 補助2	2人 主任1, 補助1	2人 主任1, 補助1
技術者の技量の影響	技術者の技量に左右されない	・技術者の技量に左右される可能性がある ・上向き作業のため、技術と体力が必要	技術者の技量に左右される可能性がある ・上向き作業のため、技術と体力が必要
作業時間 1層検線2.5mあたり ^{※1}	条件A 10min 条件B 12min 条件C 16min (条件D: 25min) ^{※2}	条件A 7min 条件B 9min 条件C 10min 条件D 11min	条件A 18min 条件B 20min 条件C 21min 条件D 22min
記録性 データ保存	探傷ピッチ 1mm 全波形記録可	探傷ピッチ 2mm 全波形記録可	探傷ピッチ 5mm 全波形記録不可
推定される き裂検出能	深さ3mm以上	深さ6mm以上	深さ6mm以上 ^{※3} 誤検出の可能性有り
調査結果の相対比較 ^{※1}	・作業速度が速い ・再現性が高い ・検出可能なき裂深さは深い	・作業速度が遅い ・再現性の確認していない ・検出可能なき裂深さは深い (浅いき裂は検出不可)	・比較していない

※1: 検証項目について、※1は今回の調査結果であり、※1以外はこれまでの文献、検討結果、実績を踏まえて推定される内容である

※2: バックネット搭載人数の制限から2人作業となるため、参考データとして扱う

※3: 高度な技術を有する技術者であれば、3mm以上も可能

(操作性の各条件は、図-5による)

いと考えられる。

通常作業は2名で実施し、作業時間も比較的短いと考えられる。

7. 普及策の検討

現場への普及策として、鋼床版AUT, SAUTを現場調査へ適用するための各種条件、適用事例を取りまとめた手引書(案)を作成するとともに、鋼床版疲労き裂の点検、補修・補強事例を取りまとめた技術資料も参考資料として作成した。

8. 考察

鋼床版疲労き裂の検知手法として鋼床版AUT, SAUTについて実橋で検証した結果、各検知手法のき裂検出深さ、記録性、作業効率を評価し、各調査業務としての適用方法を提案した。本報告では、き裂の実際の寸法について、き裂部分を切り取って確認していない。そのため、性能検証となっていないが、今回の調査結果及びこれまでの検討結果や実績を踏まえると、図-19のように考えられる。今回、作成した手引書(案)は2橋の実橋検証及び標準構成を参考に作成したものであり、実際の橋梁点検等にあたっては、架橋条件、き裂の発生頻度等、個別条件により作業効率や費用は変化するので、十分注意する必要がある。

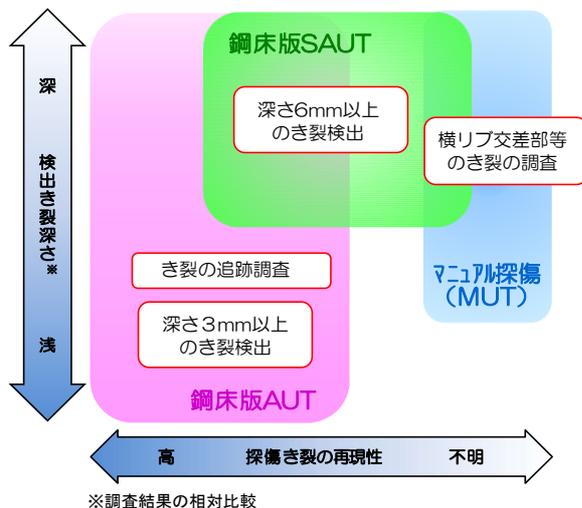


図-19 鋼床版き裂検知手法の適用方法(案)

9. おわりに

鋼床版デッキ貫通き裂の検知を効率的に行うためには、国総研資料第471号の「鋼部材の耐久性向上に関する共同研究」に示された「デッキプレート貫通き裂に着目した鋼床版段階的調査方法」による段階的調査により、検知範囲を絞り込むことを前提とする必要がある。また、今回の検証結果により、優れた検知手法でも検出領域や検出不能範囲があることから、現場における調査の目的や用途に応じて、検知手法を選択することが重要であると考えられる。

今回、鋼床版疲労き裂の新しい検知技術について、検知性能から適用範囲を提案したが、検知されたき裂の大きさによる対応方法は明確となっていない。また、き裂の進行性状を調査し、き裂の進行を予測することができれば、き裂の規模に応じた橋梁の予防的修繕や追跡調査の立案に寄与できるものと考えている。

謝辞：今回の実橋検証にあたって、鋼床版AUTの現地指導等に協力頂いた土木研究所CAESARの皆様へ感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 「既設鋼床版の疲労性状と鋼繊維補強コンクリート敷設工法による疲労強度改善効果に関する研究」土木学会論文集A, Vol. 65, 平成21年4月
- 2) 土木研究所資料第4138号：鋼床版デッキプレート進展き裂の調査のための超音波探傷マニュアル(案)，平成21年3月，独立行政法人土木研究所
- 3) 鋼床版トラフリブ溶接部の超音波探傷試験要領，平成19年4月，首都高速道路(株)