高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた鋼床版き裂検査技術の開発

超電導センシング技術研究組合 正会員 〇塚本 晃 超電導センシング技術研究組合 波頭 経裕,安達 成司,押久保 靖夫,田辺 圭一 非会員 岡山大学 非会員 塚田 啓二

## 1. 目的

高速道路の一部や大型の橋梁では鋼床版が使用されているが, 長期間に亘る通行過重負荷により鋼板(デッキプレート)に疲労き 裂が生じる問題が発生している.早期にき裂を検知し,事故を未 然に防ぐと共に計画的な維持管理を行うことが必要になっている 1). アスファルト上から検査が可能な渦流探傷法はコストや検査時 間などでメリットがあり、検出性能向上への期待は大きい.

我々は、高感度な磁気センサである高温超電導 SQUID (HTS-SQUID)の実用化を目指し、素子作製から応用システム の開発まで行っている. 高温超電導 SQUID と入力コイルをパッケ ージにした SQUID モジュール<sup>2)</sup>は,接続する検出コイルを変えるこ とで様々な用途に適用できるため、非破壊検査装置<sup>3-5)</sup>や医療検査 装置<sup>6,7)</sup>などが検討されている.



(液体窒素冷却)

Bi-2223 検出コイル

#### 図1 使用した SQUID 磁気センサの構造

今回,鋼床版のき裂検査を目的として,高温超電導 SQUID モジ ュールと電流ダイポール型励磁コイルを使用した渦電流探傷シス

テムの開発を進めてきた<sup>8,9</sup>. 厚さ 80mmのアスファルトを想定した 100mmのリフトオフ距離(検出部の底面と鋼板 試料との間隔)で長さ 50mmのスリットホール形状の模擬欠陥の検出が可能なことを確認するとともに、環境ノイズ が高い都市部の高速道路上で安定して測定できたので報告する.

### 2. SQUID 磁気センサ

液体窒素(77K=-196℃)で冷却可能な HTS-SQUID は実用レベルに性能が向 上している.液体ヘリウムでの冷却が必要な低温超電導 SQUID よりも1桁 程度検出下限が劣るものの取り扱いが容易なことから、屋外環境で使用す る金属資源探査装置(SQUITEM)<sup>10)</sup>や地磁気計測装置<sup>11)</sup>などが現場で稼働し ている.また、より過酷な環境での動作が求められる油田における油層モ ニタリング<sup>12)</sup>への展開も進み始めている.

図1に使用した SQUID 磁気センサの構造を示す. センサープローブの下 から 2/3 程度の部分が液体窒素により 77K に冷却される. プローブの先端



図2 ダイポール型励磁コイル

部分に磁気信号を捕獲するための検出コイルが固定されており、中央部分には SQUID モジュールが取り付けられて いる。地磁気(約50μT)中での移動に伴う磁場変動や励磁磁場の影響を抑えるため, SQUIDモジュールはパーマロ イおよび高温超電導体(Bi-2223)で2重に磁気シールドされている.検出コイルは高温超電導コイル2個を差動接続 した平面微分型コイルとなっており、横方向磁場の垂直方向の差分信号を検出している.検出コイルと SQUID モジ ュール間は銅線で接続されており、20Hz 以下の信号は銅線の抵抗により減衰するようになっている.

# 3. ダイポール型励磁コイル

渦流探傷法では導電性試験体に交流の励磁磁場(一次磁場)を印加することで,電磁誘導で試験体に電流(渦電) 流)を流し、渦電流から発生する二次磁場の変化を測定する手法である.非接触で測定可能であるため、アスファ ルト越しに鋼板のき裂を検査することが可能である.本開発では遠方に同一方向の磁界を印加できる電流ダイポー ル型の励磁コイル(図2)を使用した<sup>9</sup>. 中央部分(ダイポール部)に48本の配線を集中させ、他は分散させた構 造になっている.ダイポール部から相対的に大きな磁場が発生するため電流ダイポールに近い磁場分布が得られる.

キーワード 鋼床版,疲労損傷,SQUID,渦流探傷,点検診断,道路橋 連絡先 〒223-0051 神奈川県横浜市港北区2丁目 11-19 超電導センシング技術研究組合 TEL045-560-1350

### 4. 試作した鋼床版検査装置の構成

図3に3chのSQUID磁気センサを搭載した実証試験用システムの写真 を示す.アルミ台車(幅0.8m,長さ1.5m)に3本の冷却容器(ch1~3)を ななめに配置した.冷却容器の底面にダイポール型励磁コイルが固定さ れている.隣接したセンサの間隔は左右93mmと前後250mmとなっており, 1回の走査で約300mmの幅を測定可能である.干渉を防ぐため3つの励磁 コイルには異なる周波数の電流(正弦波)を流している.SQUIDで検出した 磁気信号はロックインアンプで検出し,台車の車輪に取り付けられたエ ンコーダーの信号(移動距離を測定)と共にコンピュータに取り込んで いる.測定結果はモニターにリアルタイムに表示される.計測器はすべ てバッテリー駆動になっており,5-6時間の連続測定が可能である.手押 しでの移動速度は約0.5m/sであった.

## 5. 模擬欠陥試験体の測定

図4に幅1m長さ2mの鋼板(t=3mm)に長さ100mmの2本のスリット形状の 欠陥を並べた模擬欠陥試料の測定例(リフトオフ100mm)を示す.スリット の長手方向は台車の進行方向に平行に配置されおり,ch2のセンサが真上 を通過している.測定方法を検討した結果,励磁コイルのダイポール部 分をスリット欠陥に対してななめに配置することで欠陥上に大きな信号 が発生することがわかったため,励磁コイルのダイポール部分は45°傾 いて配置されている.この条件では,鋼板のエッジ部分からはプラス方 向(赤)の信号が,欠陥からはマイナスの信号(青)が検出される.図

からわかるように100mm離れた位置から、2連の欠陥位置に対応して明瞭に信号が検出できることを確認できた.

# 6. 高速道路上での動作テスト

阪神高速5号湾岸線(運河上の橋梁部)で路上現場試験を行った.図5に測定結果を示す.走行車線左タイヤ側の轍(約50cm幅)を3回(測線1-3)に分けて測定した.路面とのリフトオフは20mmとした(デッキプレートとの距離は100mm).鋼板のエッジに対応するような信号が所々検出されており,これらは橋脚や接続部など構造的特徴と対応していた.測定した範囲では模擬欠陥



図3 3ch 実証試験用システム



図4 模擬欠陥試料の測定例



の信号に相当するき裂に対応した信号は得られなかった.現場は都市部であり,大型車の通過の際に風圧を受け, 路面も揺れるような厳しい環境であったが,SQUID センサを搭載した装置が安定して動作することを確認できた. **謝辞** 本研究は,JST の戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」 で行われました.本研究にご協力頂いた(一社)施工技術総合研究所,阪神高速道路技術(株)の方々に感謝致します.

参考文献 1) 鋼床版の疲労(2010年改訂版) (鋼構造シリーズ) 土木学会 2) A. Tsukamoto, et. al., "Development of a HTS SOUID module for use with an external pickup coil", Supercond. Sci. Technol. 26, 015013 (2013). 3) K. Sakai, et. al., "Moisture Content Evaluation Using Improved High-Tc SQUID-Based Rotating-Sample Magnetometer", IEEE Trans. Appl. Supercond. 25 (2015) 1601205. 4) T. Kiwa, et. al., "Magnetic Detection of Currents in an Electrolytic Cell Using High- Tc SQUID", IEEE Trans. Appl. Supercond. 23 (2013) 1600804. 5) J. Kawano, et. al., "Development of Non-destructive Evaluation System Using an HTS-SQUID Gradiometer with an External Pickup Coil", Physics Procedia 65 (2015) 193. 6) T. Mizoguchi, et. al., "Highly Sensitive Third-Harmonic Detection Method of Magnetic Nanoparticles Using an AC Susceptibility Measurement System for Liquid-Phase Assay", IEEE Trans. Appl. Supercond. 26 (2016) 1602004. 7) T. Morishige, et. al., "Highly Sensitive Magnetic Nanoparticle Imaging Using Cooled-Cu/HTS-Superconductor Pickup Coils", IEEE Trans. Appl. Supercond. 24 (2014) 1800105. 8) 塚本 晃 他、"高温超電導 SQUID 磁気センサを用いた鋼床版亀裂検査"、検 查技術 23, No.11 (2018) 19. 9) A.Tsukamoto, et. al.," Development of three-channel HTS-SQUID inspection system for orthotropic steel decks of expressway bridges", IEEE Trans. Appl. Supercond. 28(2019) 1601505. 10) 荒井 英一, "高温 SQUID を用いた金属資源探 査装置 (SQUITEM)の開発",応用物理 82, No.7 (2013). 11) 大久保 寛 他, "緊急地震超速報システムの実現に向けて",検 査技術 19, No.1 (2014)1. 12) 波頭 経裕 他, "高感度超電導磁気センサ (SQUID) を用いた広域電磁検層システム開発への挑戦 ",石油技術協会誌 80 (2015) 119.