

コンクリート診断士会 特別講演

鉄鋼構造物の磁気検査法の開発

2019.5.31
 岡山大学 ヘルスシステム統合科学研究科
 塚田 啓二

戦略的イノベーション創造プログラム
 Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program

インフラ維持管理・更新・マネジメント技術

- 研究開発項目: 点検・モニタリング技術の研究開発
- 研究開発テーマ: インフラ劣化評価と保全計画のための高感度磁気非破壊検査
- 研究責任者: 岡山大学 大学院自然科学研究科 教授 塚田啓二
- 研究期間: 平成26年度～平成30年度

鉄鋼構造物

- ・目視できない箇所
- ・外部から把握できない情報 → 詳細な損傷情報把握

橋梁検査

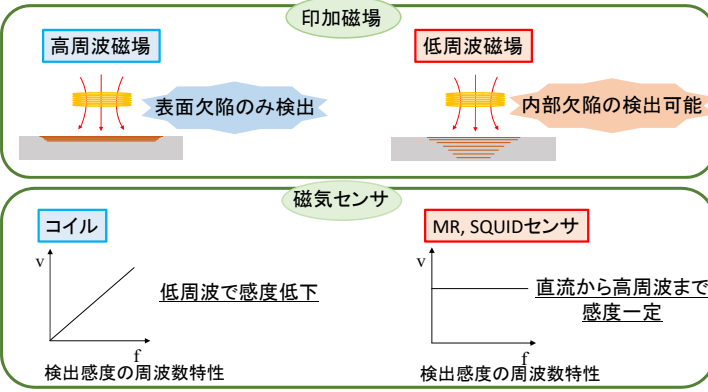
ダムゲート等の検査



本研究の基本原則(渦電流法)

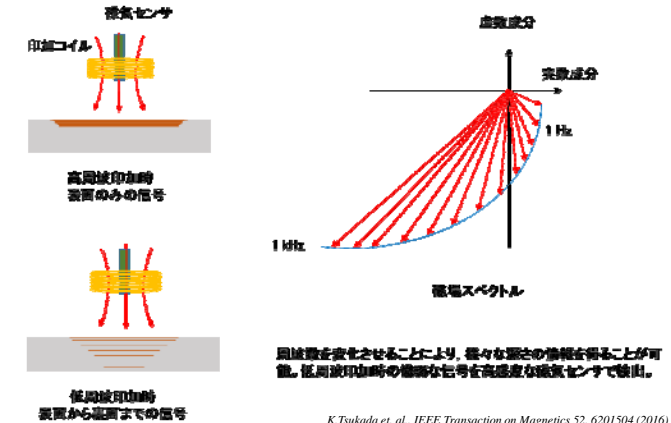
従来の渦電流探傷検査法

本研究での渦電流探傷検査法

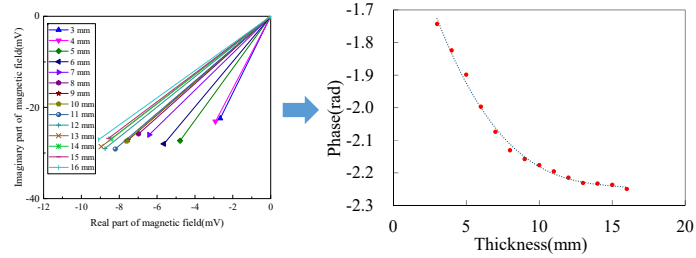


本研究の特徴 (極低周波渦電流探傷法)

ELECT Extremely Low-Frequency Eddy Current Testing

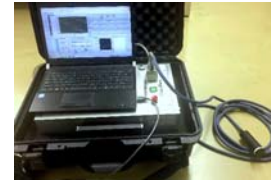


差分磁場ベクトルによる板厚の推定



位相と板厚の関係
検量線の作成

減肉検査装置



極低周波渦電流探傷検査(ELECT)装置



測定プローブ

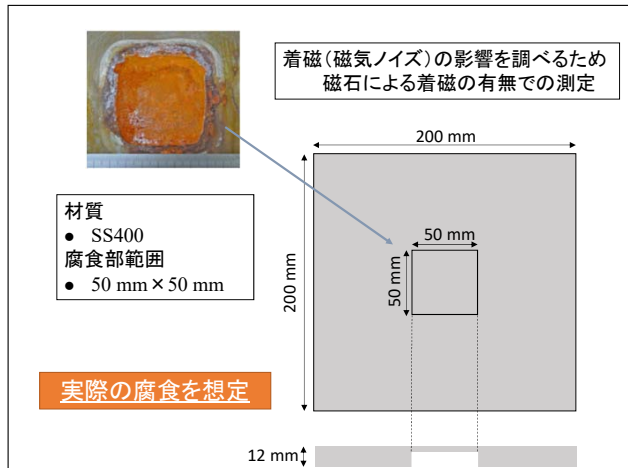


現場での測定風景

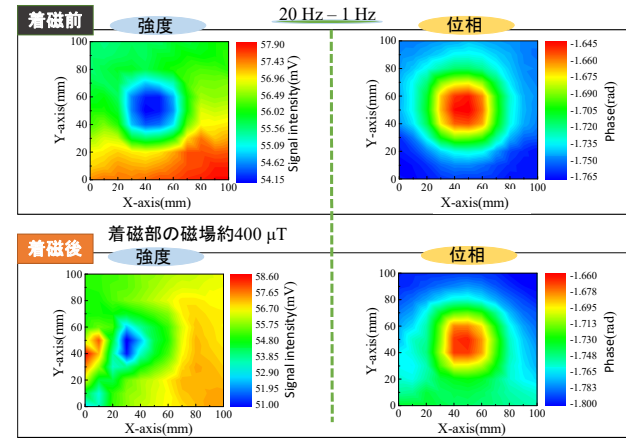


水中での測定

基礎評価




基礎評価(磁気ノイズ除去)



位相により着磁の影響によらない測定が可能

減肉検査の応用1: 橋脚の減肉測定



測定条件

- 電流 0.15 A
- 周波数 1 Hz, 20 Hz

測定範囲

- 40 cm × 24 cm
- X方向に10 cm間隔で5点
- Y方向に8 cm間隔で4点

橋梁

- 材質 SS材

腐食の穏やかな部分

座標(cm)	0	10	20	30	40
0					
8					
16					
24					

腐食の激しい部分

座標(cm)	0	10	20	30	40
0					
8					
16					
24					

腐食部の板厚

軽度腐食部


座標 (cm)	0	10	20	30	40
0	89	100	98	79	81
8	89	84	91	75	80
16	94	84	94	79	81
24	95	93	91	75	77

重度腐食部

座標 (cm)	0	10	20	30	40
0	85	73	99	35	52
8	26	75	99	37	48
16	95	90	96	36	59
24	49	50	54	48	48

錆や塗装表面からも表面処理なしで迅速に検査可能

減肉検査の応用2: 水中での橋脚腐食検査



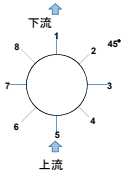
岩間大橋 (築1963年, 落橋2017年)

● 超音波検査が適用できない例
制約: 表面研磨が河川の汚染防止のため禁止

元々の厚み: 10 mm

周方向の位置	1	2	3	4	5	6	7	8
厚み (mm)	3	3	6	7	7	7	7	6

- 表面処理なしに板厚測定可能
- 下流ほど減肉現象が大きい



共同研究: 愛媛大学 全准教授

減肉検査の応用3: 各種減肉測定実績








港湾設備 橋脚 発電設備 橋脚

地際腐食検査 研究背景

従来の検査法

目視検査法

- 地際の掘削が必要
- 内部欠陥の評価が困難

超音波検査法

- 表面塗装あるいは錆の除去
- 腐食欠陥の減肉測定が困難


↓

コストや労力を費やし迅速な検査は困難

本研究

傾斜型磁気センサプローブを用いた極低周波渦電流探傷法(ELECT)

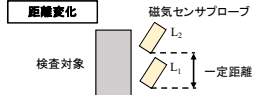
地際腐食検査への適応を検討



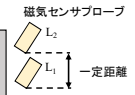
地際腐食検査


距離の異なる2点間の測定による地際の腐食の大きさの推定

距離変化




磁気センサプローブ

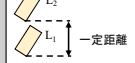





検査対象



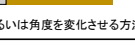
一定距離



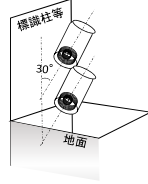
地中部




腐食欠陥




測定距離あるいは角度を変化させる方法を用いて検討



傾斜型磁気センサプローブ



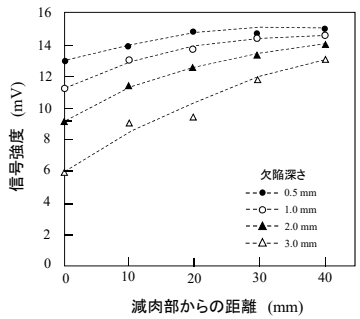


K.Tsukada et. al., IEEE Transaction on Magnetics 54, 6202104 (2018)

距離依存性

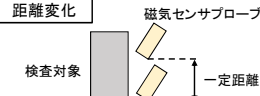
幅60 mmのサンプル

角度30度の距離依存性



欠陥深さ
 ● 0.5 mm
 ○ 1.0 mm
 ▲ 2.0 mm
 △ 3.0 mm

距離変化



磁気センサプローブ

検査対象

一定距離

地中部

腐食欠陥

欠陥深さ 小 → 大
信号強度が減少

減肉部からの距離40 mmまで
それぞれの欠陥深さが判別可能

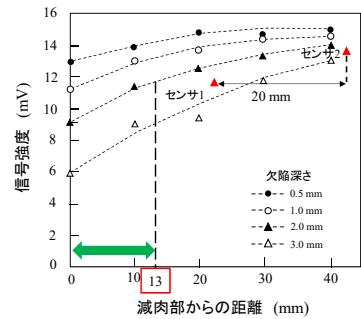
→ 現在では距離60 mmまで
判別可能

K.Tsukada et. al., IEEE Transaction on Magnetics, vol. 54, No. 11, 6202104 (2018)

腐食欠陥の位置と減肉率の推定法(1)

幅60 mmのサンプル

角度30度の距離依存性



欠陥深さ
 ● 0.5 mm
 ○ 1.0 mm
 ▲ 2.0 mm
 △ 3.0 mm

センサ1

角度30度に固定し
距離の異なる2点間の測定

↓


2点間での測定より
腐食欠陥の位置
減肉率の推定が可能

幅60 mmのサンプル

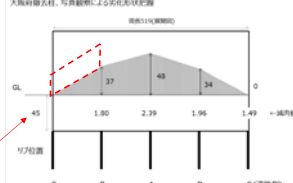
減肉部からの距離 (mm)

4

地面際下腐食サンプル検査




現在の検査 (地面を掘り返して板厚測定)

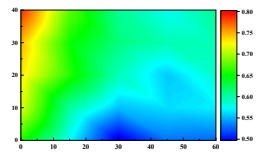


大鋼筋断面柱、写真撮影による劣化形状把握
腐食(1/4断面図)

45
37 48 34 0
1.80 2.39 1.96 1.49 ← 56内径
C B A D C (鋼筋側)
初層板厚値4.3mm



検査法 (赤線領域から斜めに下部腐食を測定)



磁気信号変化の2次元マップ

今後の地際下腐食検査法 (提案)

現在の検査
開削して腐食を検査



外観目視点検

→

近接目視
板厚調査

詳細点検

新しい検査
地表から地際下の腐食検査



非開削

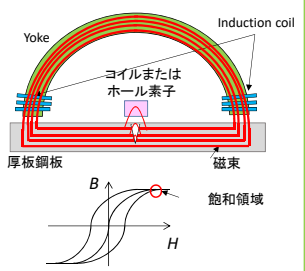
近接目視
板厚調査

迅速検査により目視と詳細
点検が同時に可能

き裂検査 (不飽和交流漏洩磁束検査法)

USAC-MFL UnSaturated AC Magnetic Flux Leakage Testing

一般的な MFL (Magnetic Flux Leakage)

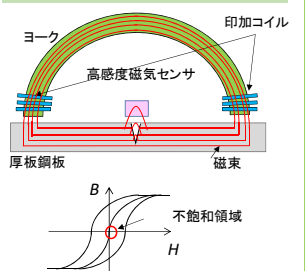


Yoke Induction coil
コイルまたはホール素子
厚板鋼板 磁束

飽和領域

- 印加磁場: 強力, 直流または低周波
- 検出信号: 漏洩磁束

開発した MFL
USAC-MFL (UnSaturated AC Magnetic Flux Leakage)



ヨーク 印加コイル
高感度磁気センサ
厚板鋼板 磁束


不飽和領域

- 印加磁場: 微弱, AC (低周波)
- 検出信号: 微弱なDC漏洩磁束 + 渦電流

K.Tsukada et al., NDT&E International Vol. 82 (2011)


表面および内部き裂検出

表面き裂



き裂 鋼板

内部き裂

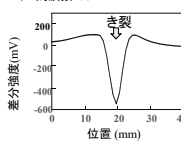


き裂 鋼板

・2つの磁気センサの差分を取ることで、磁気ノイズの影響が少なく、き裂部のみの信号変化を解析することが可能
・交流により位相変化で解析可能

■ 表面き裂 深さ: 9mm, 周波数100 Hz

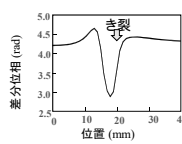
(a) 強度



差分強度 (mV)

位置 (mm)

(b) 位相

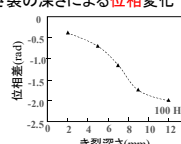


差分位相 (rad)

位置 (mm)

■ 表面および内部き裂の深さによる位相変化

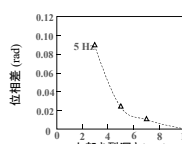
(a) 表面



位相差 (rad)

き裂深さ (mm)

(b) 内部




位相差 (rad)

内部き裂深さ (mm)

K.Tsukada et al., IEEE Trans. Magn., vol. 53, No. 11, 2501305 (2017)


き裂検出の応用： レール溶接部の検査




ガス溶接

一般的な検査


磁粉探傷




表面き裂



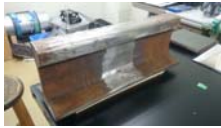
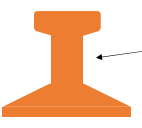

超音波検査



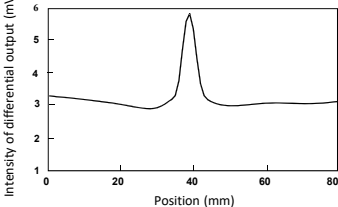
内部き裂



レール溶接部：表面欠陥

Surface defect at the web of a rail



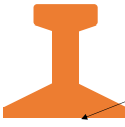
Intensity of differential output (mV)

Position (mm)

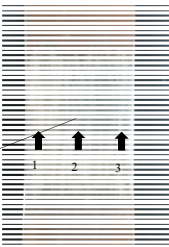
50 Hz

K.Tsukada et al., Proceedings of 12th European Conference of Non-Destructive Testing (2018)

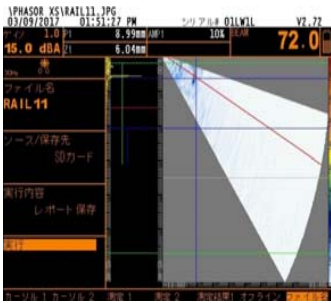
レール溶接部：内部欠陥の超音波検査



レール底部の内部欠陥




内部欠陥

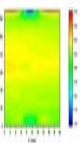
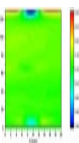
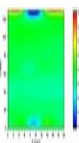
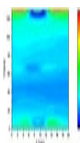
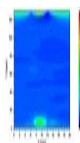
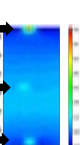
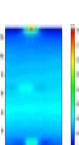
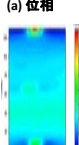
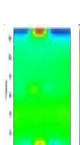
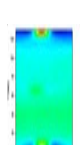


中央部の内部欠陥

超音波検査


レール溶接部：内部欠陥の超音波検査



	1 Hz	5 Hz	10 Hz	20 Hz	50 Hz
(a) 位相					
(b) 強度					

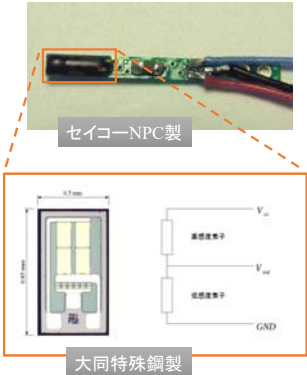
渦電流式マイクロプローブによるき裂検出

2ch集積化磁気プローブ



TMRセンサー

コイル: 内径 $6.0 \times 2.5 \text{ mm}^2$
 外径 $7.7 \times 4.5 \text{ mm}^2$
 巻数 60巻
 銅線 0.25Φ




セイコーNPC製

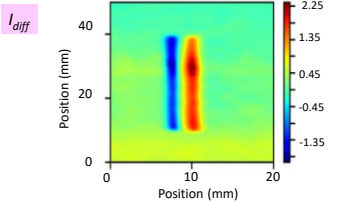
大同特殊鋼製

K.Tsukada et al., IEEE Trans. Magn, vol. 54, No. 11, 202205 (2018)

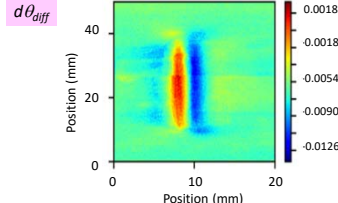
き裂のマッピング: 人工き裂



● き裂 30 mm length, 1mm width, 5 mm depth
 ● 周波数 200 Hz



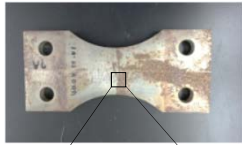
I_{diff}



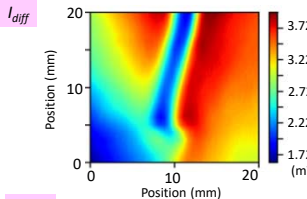
$d\theta_{diff}$

- き裂形状を反映
- き裂両側に2つのピーク

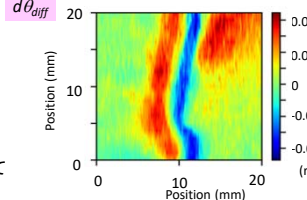
き裂のマッピング: 疲労き裂



← crack



I_{diff}




$d\theta_{diff}$

● Frequency 200 Hz

● 幅がないき裂でも信号変化が得られている。

研究段階 コンクリートの水分

モルタル, コンクリート



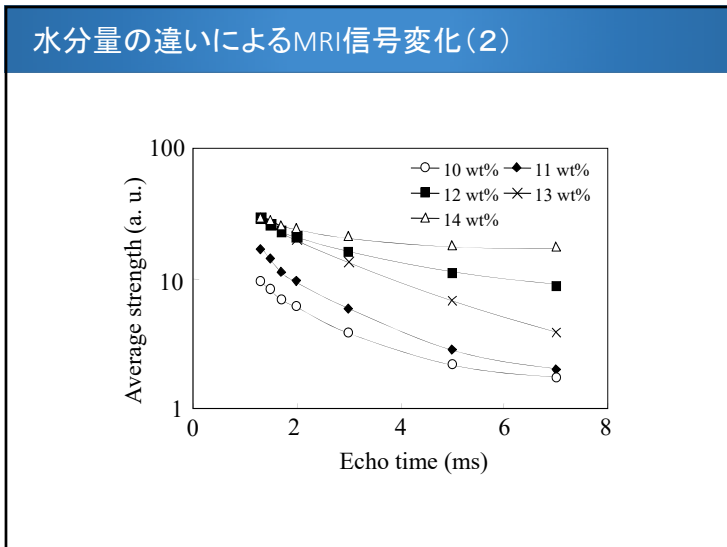
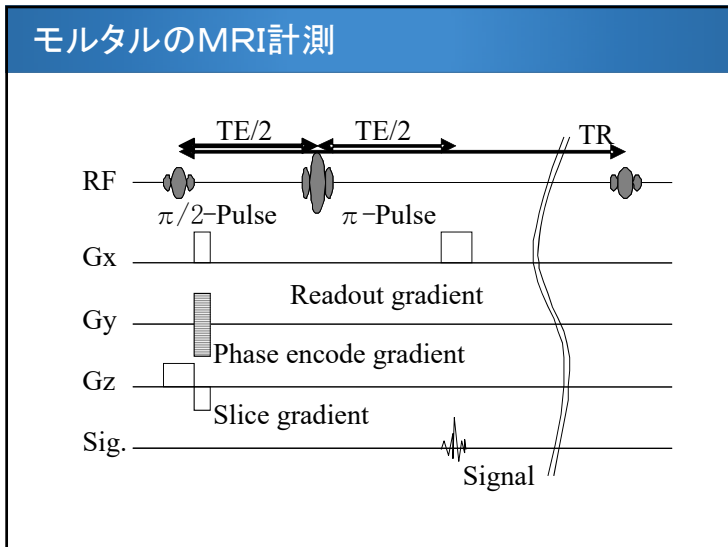
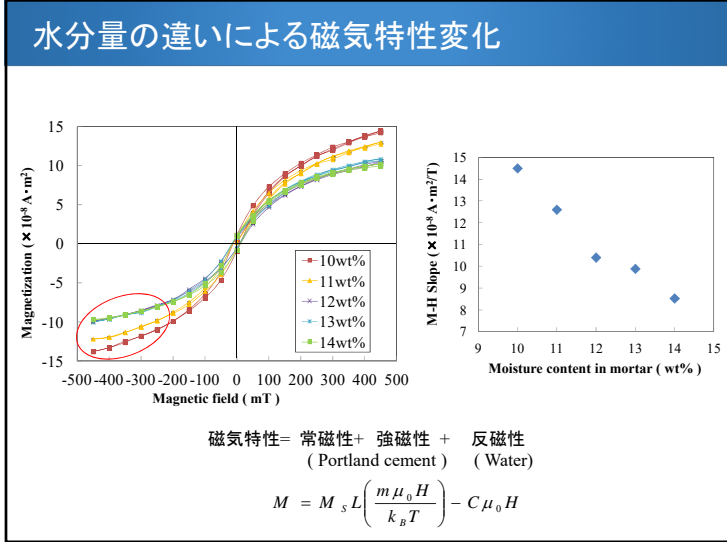
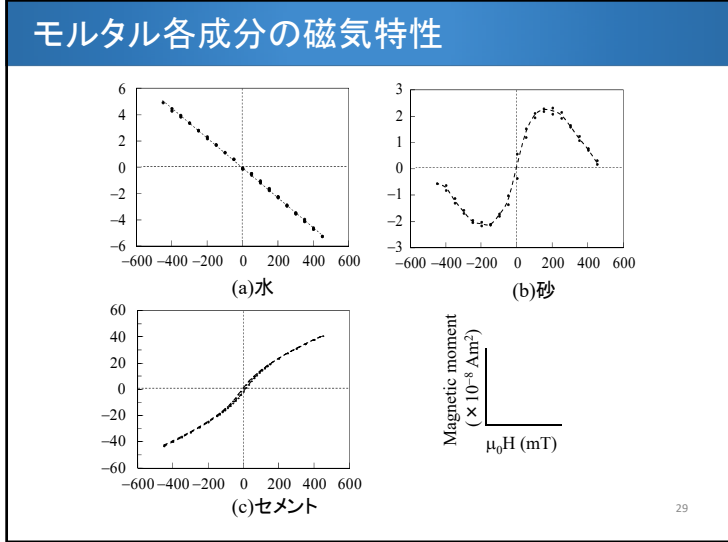
Portland cement + Standard sand + water = Concrete and mortar

腐食, 凍結, 機械応力に対する耐性は水分量に大きく影響

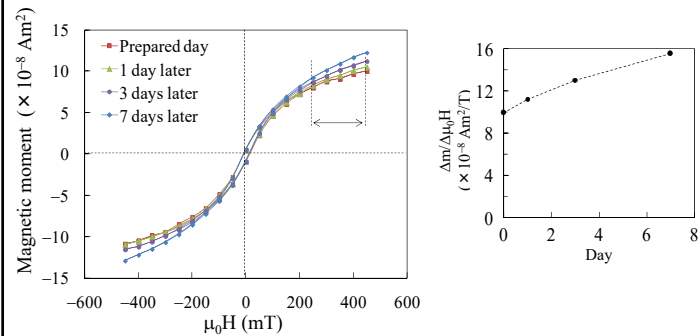
モルタル = 異なる磁性材料の混合物

Portland cement	+	sand	+	water
1	:	3	:	
(強磁性体)		(常磁性, 反磁性)		(反磁性)

一般的な水分量: 11 - 13 wt%



経時変化(水和化)



モルタル作成時の水分量と時間経過による水和量を検出することに成功
 ← MRIによる自由水と結合水の変化測定と相関

K. Tsukada, et. al. J. A. P. vol. 115, No. 17 (2014)

まとめ

1. 極低周波渦電流探傷検査(ELECT)法を開発し、鋼材の腐食による板厚減肉を測定可能
2. 斜め磁気プローブにより地際下腐食を測定可能
3. 数10mm程度のリフトオフでも測定できるので、錆、土、水に影響を受けずに測定可能
4. 不飽和交流磁束漏洩探傷法(USAC-MFL)法により低消費電力で鋼材の内部き裂を検出可能
5. 一つの印加コイルに複数の磁気センサを集積化した小型渦電流プローブにより鋼材の表面き裂を容易に検出可能

補足. 磁気計測によるコンクリートの水分量測定は可能性有