

第33回

千葉県非破壊検査研究会・研究発表会

講演資料

日時 平成31年2月15日(金)

13:30~17:00

場所 千葉県産業支援技術研究所

目次

1. 研究発表

①保護材上からの鋼管腐食の渦電流試験による検出	2
日本大学生産工学部 電気電子工学科	藤田 佳秀、小井戸 純司、 日比野 俊、加藤 修平
②鋼材の渦電流試験におけるローレンツ力の影響についての基礎的検討	8
日本大学生産工学部 電気電子工学科	田村 寛治、小井戸 純司、 日比野 俊、加藤 修平
③埋設材路面境界部の調査測定のプロ案 ～インフラ老朽化対策に即して～	12
(有)NS 検査	新美 久仁彦
④高精細X線CT装置を利用した高炉水砕スラグと砂利の混合比管理の調査研究	17
千葉県産業支援技術研究所 材料技術室 研究員	松岡 弘巳
⑤CNDI 鉄骨溶接部超音波探傷回送実験のその後	24
立川NDTテクノ	立川 克美

2. 特別講演

演 題： AI 技術によるひび割れ自動検知を活用したコンクリート構造物の 画像ベース点検	31
講 師： 株式会社 東設土木コンサルタント 事業推進部 営業統括グループマネージャー 多田 佳史 氏	

研 究 発 表

渦電流試験による保護材上からの鋼管腐食の検出に関する研究

日本大学大学院 藤田 佳秀、日本大学生産工 小井戸 純司
日本大学生産工研究員 日比野 俊、日本大学生産工 加藤 修平

1. まえがき

現在、多くのプラント等では、水、空気、油、ガスなどを、鋼管を用いた配管により輸送している。これらの鋼管は一般的に断熱材とその上の保護材（薄鋼板）で覆われているが、断熱材と保護材を撤去せずに検査したいという要望がある。現状では、部分的に撤去して部分的に検査をしている。

これに対し、渦電流探傷試験(ECT)を適用したいという要望があるが、断熱材を介することによって発生する大きなリフトオフと、保護材が強磁性体であるために磁束が鋼管に届きにくいという問題がある¹⁾。そこで保護材の影響を解析し、保護材がある状態、さらに大きなリフトオフ下でのきずの検出方法を検討し、いくつかの知見を得ることができたのでその概要を報告する。

2. 原理

2.1 腐食検出の際の問題点

Fig.1に示すように一般に鋼管の周りには、断熱材がありその上に保護材がある。保護材上から鋼管の腐食を検出する際の問題点としてまず、保護材が、国内では一般的に亜鉛鋼板がよく用いられ、電気磁気的特性として導電率が高く比透磁率も強磁性体であるために高い。そのため保護材で電磁誘導現象が起こりコイルからの磁束が打ち消され鋼管まで届きにくいと予測される。さらに断熱材は電気的特性が空気と同じで導電率は0

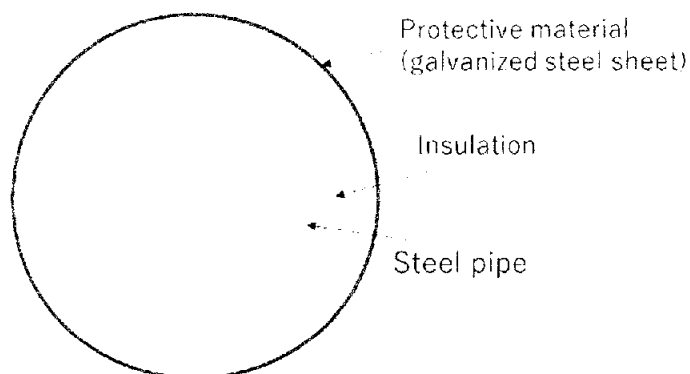


Fig.1 Cross sectional view of steel pipe

であり、比透磁率は1であるが、厚さが数十mmあるため、これによってもコイルから発生した磁束が鋼管まで届きにくく、腐食検出が困難となると予測される。

2.2 腐食検出における問題の解決法

Fig.2に本研究に用いた鋼管腐食検出用のECTシステムを示す。鋼管腐食検出装置は励磁コイルから発生した交流磁界により対象の鋼管を磁化し、これに渦電流を発生させる。この渦電流が更に周囲に交流磁界を発生させることにより、検出用コイルに交流電圧が誘起される。また、鋼管に腐食が存在した場合にはこの部分が空気であるため渦電流がこれを避けるので交流磁界が変化し、それに伴い検出用コイルに誘起される交流電圧も変化する。これにより鋼管に存在する腐食を検出することが可能である。一方、今回の場合のように試験コイルと検査対象の鋼管の間に保護材が挿

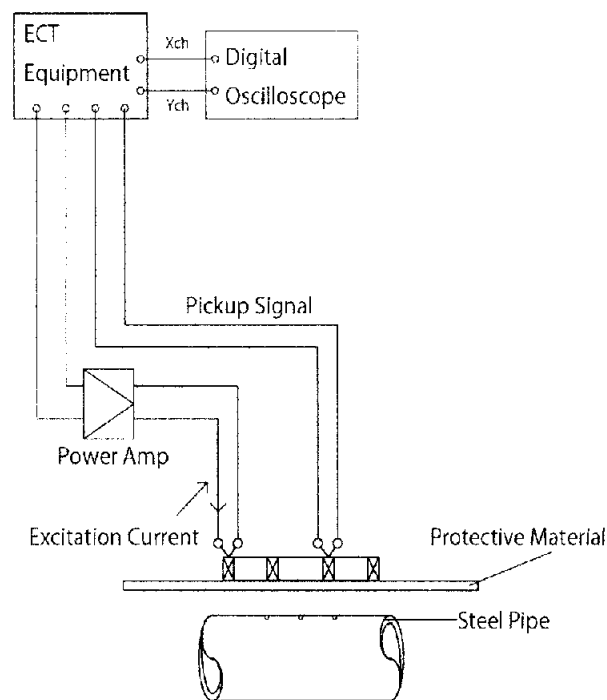


Fig.2 Experimental apparatus for ECT

Study on Corrosion Detection of Steel Pipe through Protective Material
by Eddy Current Test
Yoshihide FUJITA

入されると磁束が打ち消され、検出に影響を与えらるると考えられる。そこで保護材の影響を低減させるために保護材を磁気飽和させる。Fig.3に示すように、保護材は強磁性材料であるため、電磁石で外部から強い磁界を与えると磁気飽和し、比透磁率が低下する。これによって保護材の影響が緩和され、保護材(亜鉛鋼板)を介して鋼管の腐食検出が可能となると考える。また、磁束は距離により減衰するため、リフトオフがある場合、鋼管上の渦電流が小さくなり、腐食検出が極めて難しくなると考えられる。そこで、この問題の解決のため、探傷システムのSN比を向上させた。すなわち、励磁コイルの径を大きくし、検出コイルの巻数を増加し、励磁コイルから発生する磁束を増加するために交流の励磁電流を増幅回路により増幅する。また、試験コイルには相互誘導形差動方式を採用した。

これらによって保護材を介して鋼管の腐食が検出可能になると考える。

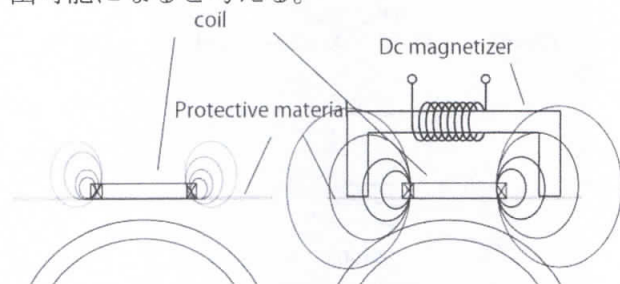


Fig.3 Influence of protective material

3. 有限要素法(FEM)による保護材の影響及びきずの検出の検討

3.1 FEMによるきず検出のシミュレーション方法

動磁場解析ソフト「EDDYjω」を使用し、解析モデルを作成した。Fig.4にFEMで解析を行ったモデルを示す。

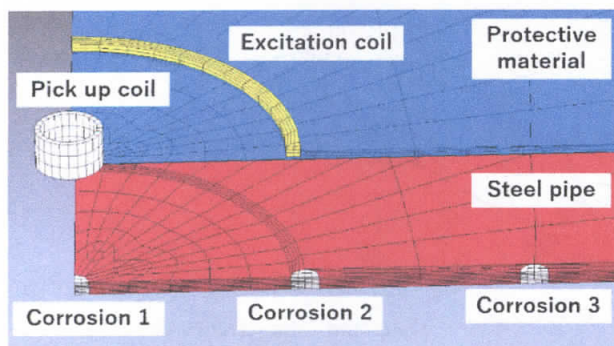


Fig.4 FEM model for ECT

要素数が多いことで計算過程において計算誤差が蓄積されてしまう恐れがあるため、モデルの対称性を利用し、1/4モデルとした。さらに実際の鋼管は円筒状であるが、計算を簡略化させるために平板状として計算を行った。鋼管は、1辺 500 mm、厚さ 5 mmの鋼板とし、保護材は、1辺 250 mm、厚さ 0.3 mmとした。一方、励磁コイルは、内径 150 mm、外径 160 mm、厚さ 3 mm、電流値 1 A、検出コイルは、内径 20 mm、外形 24 mm、厚さ 15 mmとした。また、鋼管と保護材の間には断熱材があると想定し、50 mmの間隔を設け、励磁コイル、検出コイルと保護材の間には、コイルのボビンがあると想定し、1 mmの間隔を空けた。また、鋼管の内面と外面にそれぞれ直径10 mm、減肉率70%、50%、30%、10%の模擬腐食を設置した。さらに励磁コイルの上端と導体板の下端にそれぞれ200 mmの空気層を設けた。解析で使用した材質のパラメーターはTable 1のように設定した。

Table 1 Values of physical property

	Material	Permeability	Conductivity[S/m]
Protective material	Galvanized steel sheet	20	6.25×10^6
		50	6.25×10^6
		100	6.25×10^6
		341	6.25×10^6
	Stainless	1	1.30×10^6
	No protective material	1	0
Steel pipe	Steel	100	6.25×10^6
		341	6.25×10^6

3.2 FEMによる解析結果

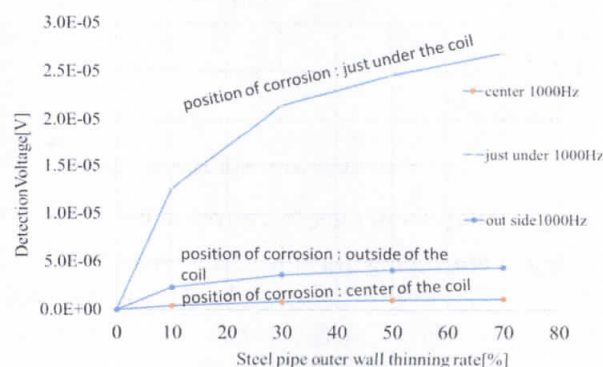


Fig.5 Detection voltage at corrosion position

Fig.5はきずの位置における検出電圧のFEMによる解析結果である。試験周波数は1 kHz、保護材はなしの状態での解析を行った。鋼管の減肉率の大きさにかかわらず、きずの位置が励磁コイル直下にある場合、きずの検出電圧が一番大きくなるのが分かる。よって検出電圧が大きく出た場合、きずの位置は検出コイルの直下ではなく励磁コイルの直下であることが確認できた。

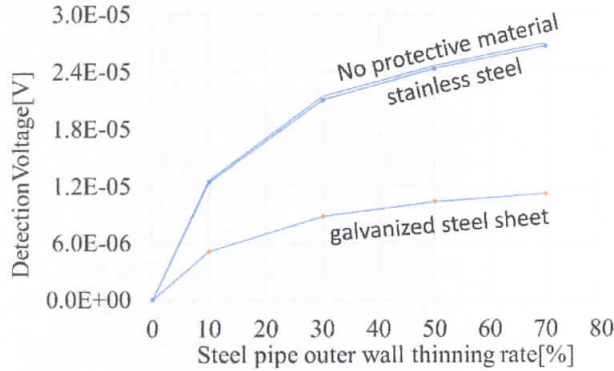


Fig.6 Analysis of outside corrosion by FEM(1 kHz)

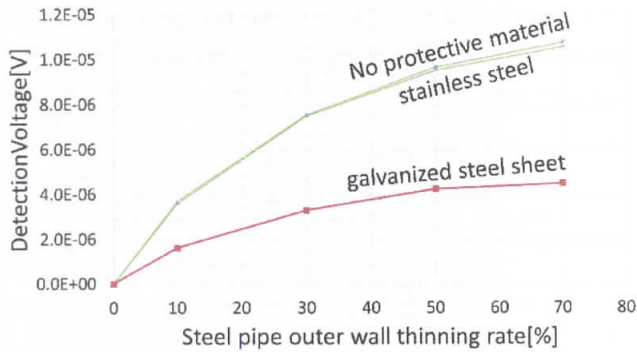


Fig.7 Analysis of outside corrosion by FEM(400 Hz)

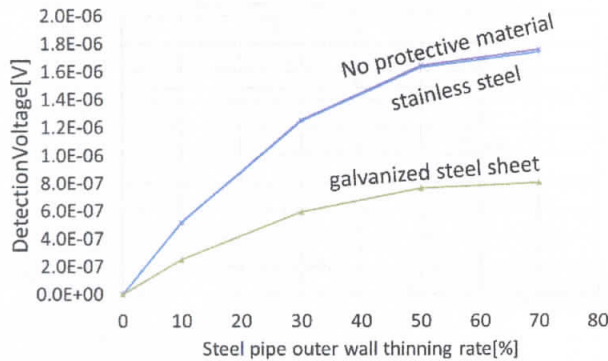


Fig.8 Analysis of outside corrosion by FEM(100 Hz)

Fig.6、Fig.7、Fig.8はFEMによる外面きずの解析結果である。試験周波数はそれぞれ100 Hz、400 Hz、1 kHzであり、保護材がなし、ステンレス、亜鉛鋼板の3種類で鋼管の外面きずの解析を行った。グラフから減肉率70%に着目すると、保護材がなしと保護材がステンレスの場合ではどの周波

数でも、ほとんど検出信号に差がないことが確認できた。しかし、保護材が亜鉛鋼板の場合では保護材がない状態と検出信号の大きさに2.5倍の差があることが確認できた。つまり保護材がステンレスであれば保護材の影響をほとんど受けずに検出が可能になると考えられるが、保護材が亜鉛鋼板の場合であると影響が大きいと予測できる。さらに、周波数別に見ると、高周波の方が電磁誘導現象から検出電圧が大きい、低周波の方が保護材が亜鉛鋼板の場合と、保護材がなしの状態の差が若干小さいことが確認でき、低周波の方が保護材の影響は受けにくいことが分かった。

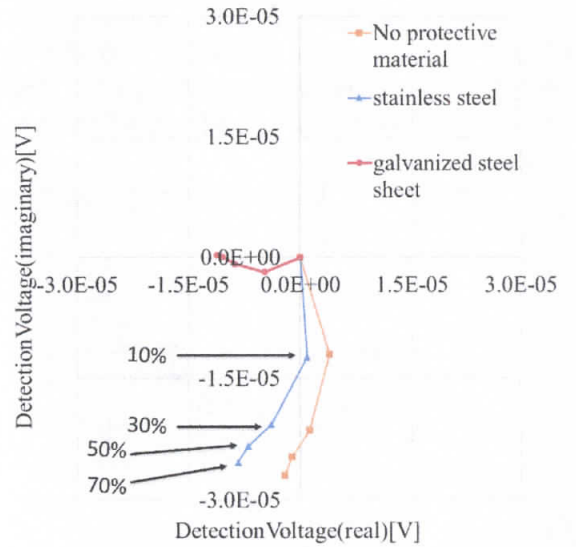


Fig.9 Detected voltage vector diagram of outside corrosion by FEM(1 kHz)

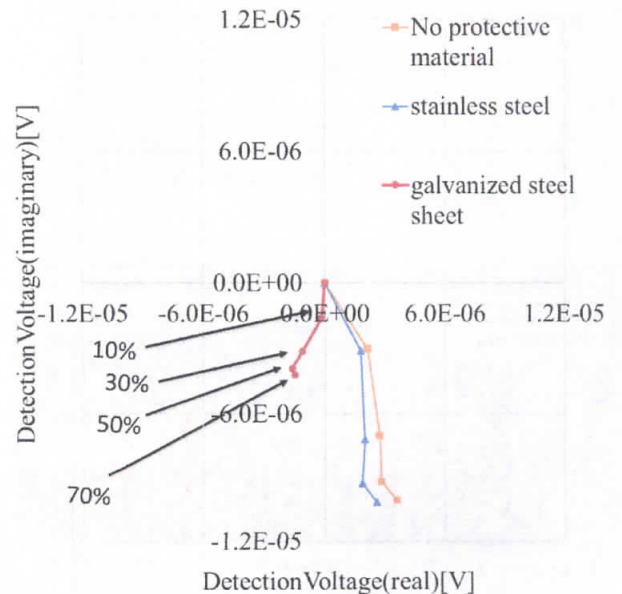


Fig.10 Detected voltage vector diagram of outside corrosion by FEM(400 Hz)

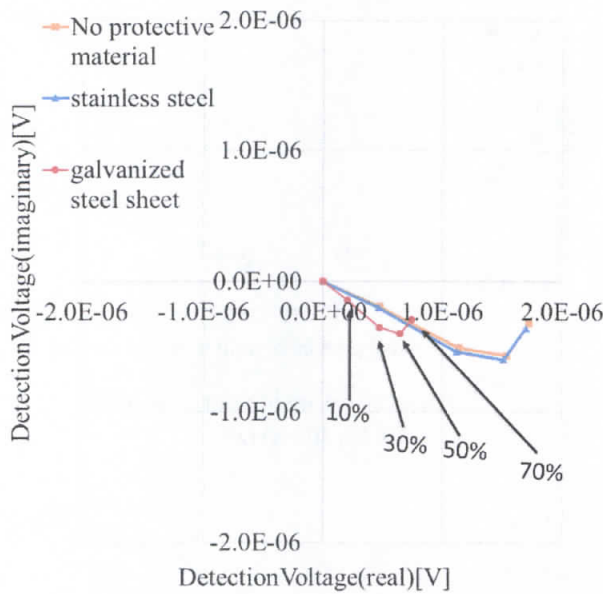


Fig.11 Detected voltage vector diagram of outside corrosion by FEM(100 Hz)

Fig.9、Fig.10、Fig.11はFEMによる鋼管の外表面の解析結果の複素平面図である。試験周波数はそれぞれ100 Hz、400 Hz、1 kHzであり、保護材がなし、ステンレス、亜鉛鋼板の3種類のグラフとした。グラフからすべての周波数で減肉率の大きさによって位相の変化が見られ、周波数が高いほど、位相の変化が顕著になっていることが確認できる。保護材を介して渦電流探傷試験を行った場合と、保護材がない状態で渦電流探傷を行った場合では位相に違いが現れたものの、減肉率の大きさによる位相の変化は似たようなグラフとなり、保護材があっても減肉率の大きさを位相から推定できることを確認した。

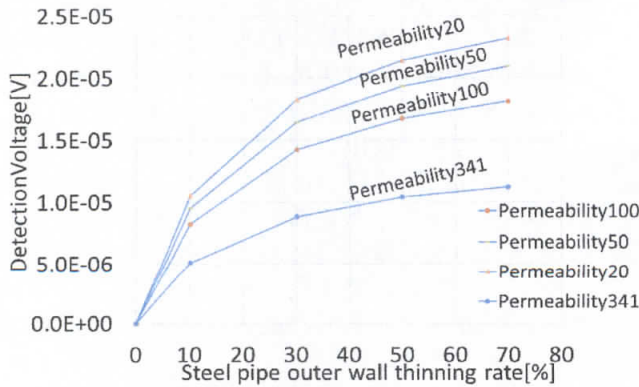


Fig.12 Effect of decreasing permeability of protective material(1 kHz)

Fig.12は保護材である亜鉛鋼板を電磁石で磁化させたと仮定して透磁率を下げた場合について、鋼管の外表面の解析を行った。試験周波数は1 kHzとし、亜鉛鋼板の透磁率をそれぞれ341、

100、50、20で解析を行った。亜鉛鋼板の透磁率341で鋼管の外表面を検出を行った場合よりも、亜鉛鋼板を磁化させて透磁率を20まで下げることにより、検出電圧に2.1倍の差が出ることを確認できた。これにより保護材の透磁率を下げることで保護材の影響を小さくすることができることを確認した。

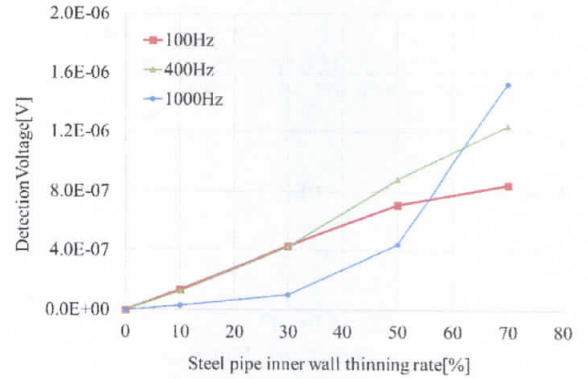


Fig.13 Analysis of inside corrosion by FEM (No protective material)

Fig.13は保護材がない場合の鋼管の内表面の解析である。試験周波数は100 Hz、400 Hz、1 kHzで行った。まず、リフトオフが50 mmある状態で鋼管の内表面腐食検出が不可能でないことを確認した。そして、鋼管の減肉率が小さい場合低周波の方が検出電圧が大きく、減肉率が70%になると1 kHzの方が検出電圧が大きいことが確認できた。比較的小さな内面きずを検出するには低周波で探傷を行う必要があることが分かる。さらに、Fig.6の保護材なし、減肉率70%、1 kHzとFig.13を比較すると外表面きずと内表面きずでは検出電圧の大きさに17.6倍の差があることを確認した。

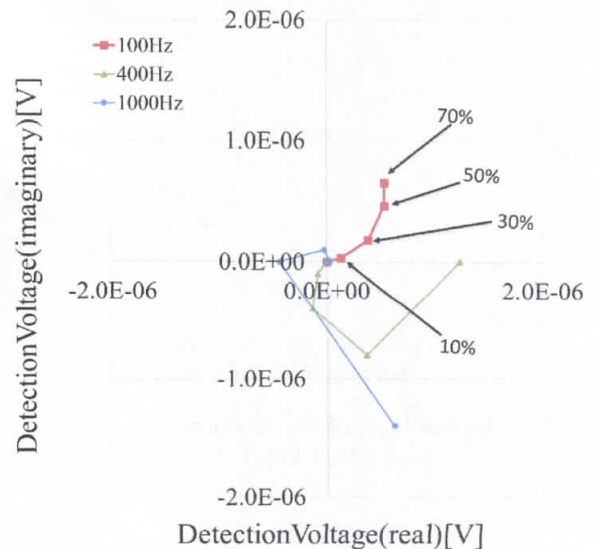


Fig.14 Detected voltage vector diagram of inside corrosion by FEM(No protective material)

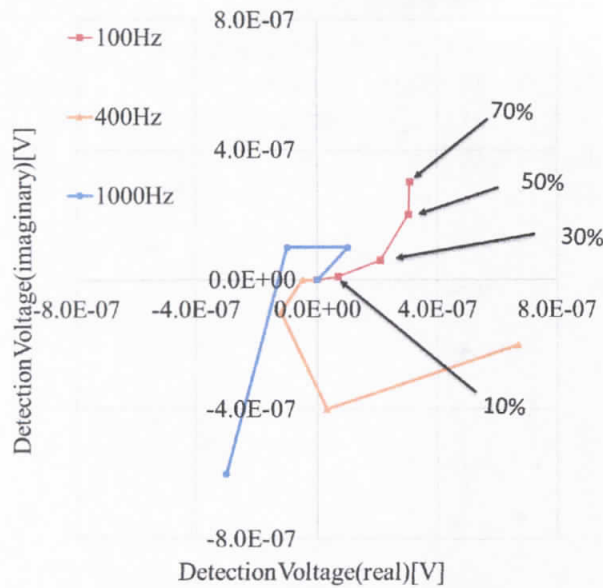


Fig.15 Detected voltage vector diagram of inside corrosion by FEM
(Protective material : galvanized steel sheet)

Fig.14は保護材がない場合の鋼管の内面きず検出、Fig.15は保護材である亜鉛鋼板の複素平面図である。グラフからすべての周波数で減肉率の大きさによって位相の変化が見られ、周波数が高いほど位相の変化が顕著になっていることが確認できる。保護材を介して内面きず検出を行った場合と、保護材がない状態で内面きず検出を行った場合では、グラフの形が非常に似ていることが分かった。外面きず検出と比べた場合、減肉率による位相の変化は内面きず検出の方が変化が大きいことが確認できた。

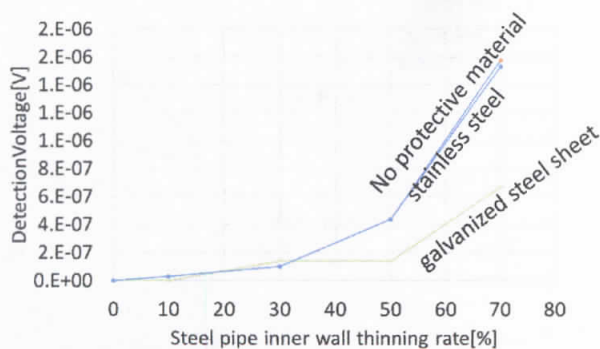


Fig.16 Analysis of inside corrosion by FEM(1 kHz)

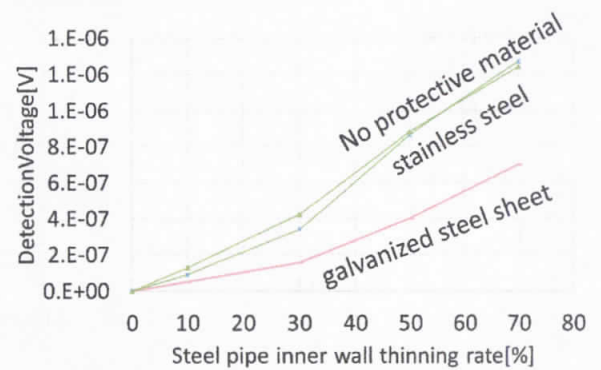


Fig.17 Analysis of inside corrosion by FEM(400 kHz)

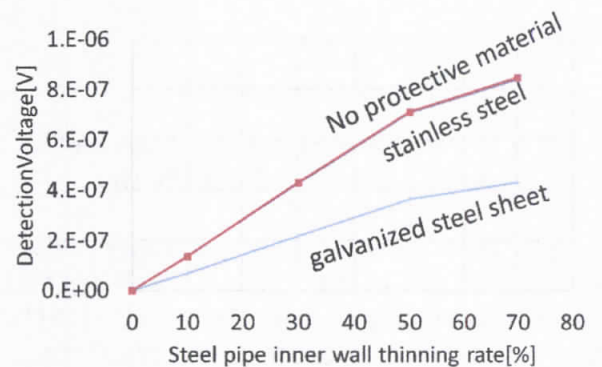


Fig.18 Analysis of inside corrosion by FEM(100 kHz)

Fig.16、Fig.17、Fig.18はFEMによる鋼管の内面きずの解析結果である。試験周波数はそれぞれ100 Hz、400 Hz、1 kHzであり、保護材がなし、ステンレス、亜鉛鋼板の3種類で鋼管の内面きずの解析を行った。グラフから減肉率70%に着目すると、保護材がなしと保護材がステンレスの場合ではほとんど検出信号に差がないことが確認できた。また、試験周波数が1 kHzの場合、保護材が亜鉛鋼板の場合では保護材がない状態と検出信号の大きさに2.4倍の差があることが確認できた。つまり、外面きず検出と同じように保護材がステンレスであれば保護材の影響をほとんど受けずに検出が可能になると考えられる。保護材が亜鉛鋼板の場合であると検出信号の大きさがそのまま小さくなることが確認できた。SN比を上げることができれば保護材を介して内面きずの検出は可能であると考えられる。

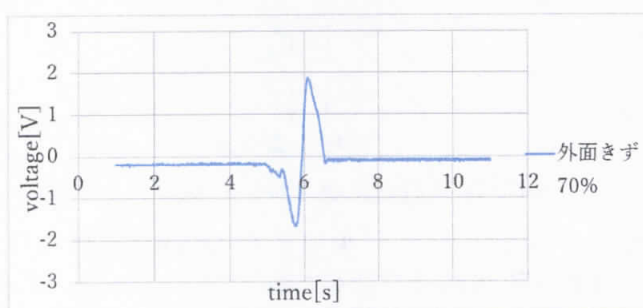
4. 実測による保護材上からの鋼管腐食検出の検討

4.1 実験方法

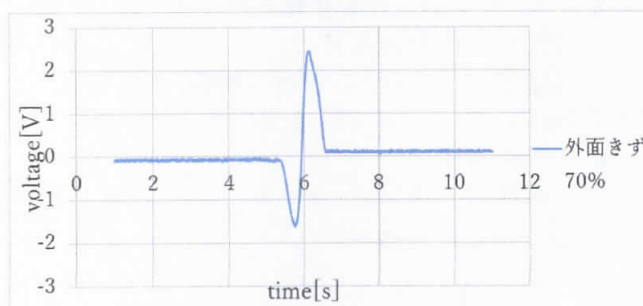
鋼管は厚さ 5 mm、長さ 1,600 mm、外径 165 mm であり、その外面に直径 10 mm、減肉率 70 %、

50%、30%、10%のきずと内面に減肉率50%のきずを平底ドリル穴で200mm間隔で模擬腐食として加工してある。励磁コイルは外径160mm、巻線径0.6mm、巻数37回、検出コイルは平均直径22mm、巻線径0.12mm、巻数1,120回で作製した。試験周波数は100Hz~1kHzとした。交流の励磁電流は増幅回路を使用して増幅し、1Aとした。また、保護材なしの場合と保護材が厚さ0.3mmのステンレスの場合で腐食検出の実験を行った。鋼管上の試験コイルのリフトオフを50mmに保ち、模擬腐食上を走査し、デジタルオシロスコープによってECT装置の出力信号を記録した。

4.2 実験結果及び検討

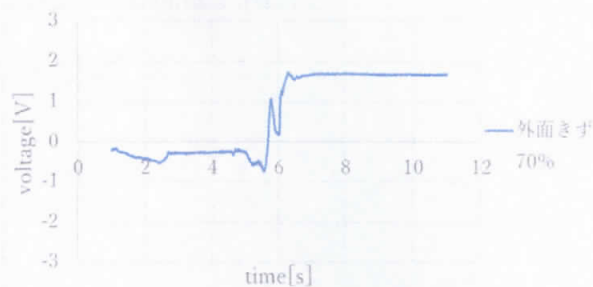


(a) X ch signal (lift-off noise)
(No protective material)



(b) Y ch signal (defect signal)
(No protective material)

Fig.19 Defect signal with no protective material



(a) X ch signal (lift-off noise)
(Protective material : stainless steel)



(b) Y ch signal (defect signal)
(Protective material : stainless steel)

Fig.20 Defect signal with protective material

Fig.19(a), (b)は、保護材なし、励磁電流1A、試験周波数1kHzで、それぞれ鋼管の減肉率70%の外面きずに対する探傷波形を示している。また、リフトオフの雑音はXchに出力されるように同期検波の位相を調整し、Ychに検出信号が出るようにした。Fig.19(b)を見ると保護材なし、リフトオフ50mmの状態にきず検出ができています。

Fig.20(a), (b)は、保護材ステンレス、励磁電流1A、試験周波数1kHzで、それぞれ鋼管の減肉率70%の外面きずに対する探傷波形を示している。Fig.20(b)を見るときずの検出が確認でき、Fig.19(b)と比較すると、検出信号の大きさに保護材なしと保護材ステンレスで変化が見られないことが確認できた。

5. まとめ

本研究では大きなリフトオフ下、さらに保護材を用いてきずの検出が可能か検討した。SN比を上げることにより50mmというリフトオフ下でもきずの検出が可能となり、保護材がステンレスであれば保護材の影響がほとんどなく、探傷が可能であることを確認した。今後、強磁性材料の保護材である亜鉛鋼板でも探傷可能にするための検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 真保他、保護材上からの鋼管腐食について、第20回表面探傷シンポジウム、pp.47-50(2017)

鋼材の渦電流試験におけるローレンツ力の影響についての基礎的検討

日大生産工(院) ○田村 寛治 日大生産工 小井戸 純司
 日大生産工研究員 口比野 俊 日大生産工 加藤 修平

1 まえがき

管、棒、板などの鋼材の割れや穴などのきずを非破壊検査的に検出することに渦電流試験が用いられるが、その際は磁気ノイズを軽減するために直流磁気飽和を併用する必要がある。ところが、直流磁気を掛けた状態で渦電流を誘導すると、渦電流にローレンツ力が働くため、渦電流分布が変化する。したがって、たとえば、きずの検出感度などにローレンツ力が影響を及ぼす可能性がある。そこで、本研究ではローレンツ力が渦電流試験に与える影響を検討した。

2 原理

Fig.1にローレンツ力の原理と本研究に用いたタンジェンシャルコイルを示す。荷電粒子が磁場中を運動すると力を受ける。これをローレンツ力という。式(1)に示すように、ローレンツ力 F は渦電流 J と磁束密度 B のベクトル積で求まる¹⁾。そして、ローレンツ力の大きさは式(2)に示すとおりである。

$$F = J \times B \quad (1)$$

$$|F| = |J \times B| = JB \sin \theta \quad (2)$$

ここで θ は磁束密度 B と渦電流 J のなす角度である。

渦電流試験は試験コイルに交流電流を流すことによって交流磁界を発生させ、それを試験体に作用させることによって誘導電流を発生させる。このとき、別途加えた直流磁束密度によってローレンツ力が働いて渦電流分布が変化する。試験コイルのインピーダンスが変化すると思われる。式(2)より、渦電流に作用するローレンツ力は角度 θ が $\pi/2$ のときに最も影響が強いと考えられる。

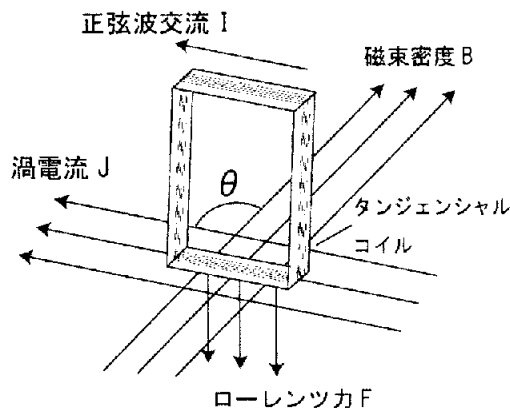


Fig.1 渦電流に働くローレンツ力

3. タンジェンシャルコイルの性能評価

3.1 実験方法及び測定方法

本研究では、渦電流分布を直線状にするために、タンジェンシャルコイルを用いたが、その検出特性はあまり知られていないので基礎的な特性を確認した。

試験体として厚さ5 mmの銅板、アルミ板、黄銅板、ステンレス板を用いた。Fig.2に実験装置を示す。

試験コイルは、パンケーキコイルとタンインピーダンスメーター

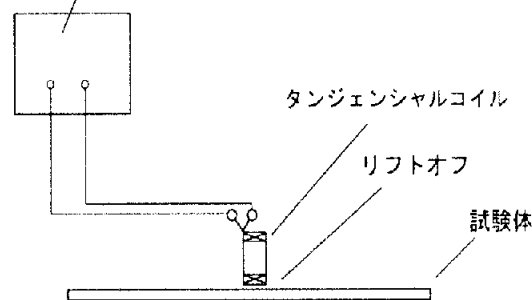


Fig.2 タンジェンシャルコイルの性能評価で使用した実験装置

Fundamental Study on Influence of Lorentz Force in Eddy Current Testing for Steel Material

Kanji TAMURA, Junji KOIDO, Takashi HIBINO and Shuhei KATO

ジェンシヤルコイルを使用した。試験周波数は、2kHz、4kHz、8kHz、16kHz、32kHzとした。次に、雑音源としてリフトオフを0.1mmとし、同様の試験体、周波数で測定した。

3.2 実験結果および検討

Fig.3は、各試験体をタンジェンシヤルコイルとパンケーキコイルで測定した正規化インピーダンスのグラフである。左側の小さい軌跡がタンジェンシヤルコイル、右側の変化が大きい軌跡がパンケーキコイルである。各コイルにおいて、ステンレス、黄銅、アルミ、銅と導電率が高くなるにつれて、リアクタンス成分が下がっていることが分かる。同様に周波数が高くなるとリアクタンス成分が下がる。2つのコイルをのインピーダンス変化量を比べると、タンジェンシヤルコイルの変化量は約1/4と小さいので、感度に1/4の差があることが確認できた。

次にFig.4、Fig.5は、周波数4kHzで各試験体において、リフトオフが0mmと0.1mmのときをタンジェンシヤルコイルとパンケーキコイルで測定したものである。リフトオフが0mmと0.1mmの場合では、0.1mmの方が変化が小さくなっているので感度が低くなることが確認できる。

Fig.6、Fig.7は、タンジェンシヤルコイルのSN比を求めてグラフにしたものである。SN比は、次のようにして求めた。

$$SN比 = \frac{S}{N} \quad (3)$$

S: 導電率の変化(銅→アルミ、銅→ステンレス)

N: 銅板上のリフトオフの変化(0→0.1mm)

Fig.6は、銅→アルミを信号とした場合のSN比を取ったもので、パンケーキコイルとタンジェンシヤルコイルのSN比は一致していることが分かる。Fig.7は、銅→ステンレスでSN比を取ったもので、Fig.6と同様にほとんどSN比が一致していることが分かる。このことから、タンジェンシヤルコイルのリフトオフ雑音に対するSN比は、パンケーキコイルとほとんど同一であることが確認できた。

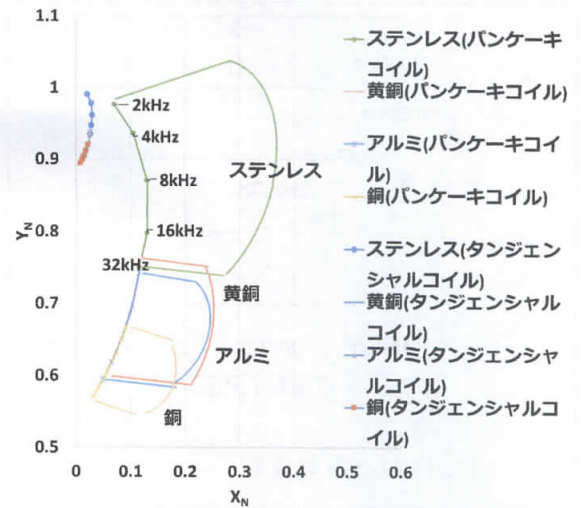


Fig.3 タンジェンシヤルコイルとパンケーキコイルのインピーダンス比較

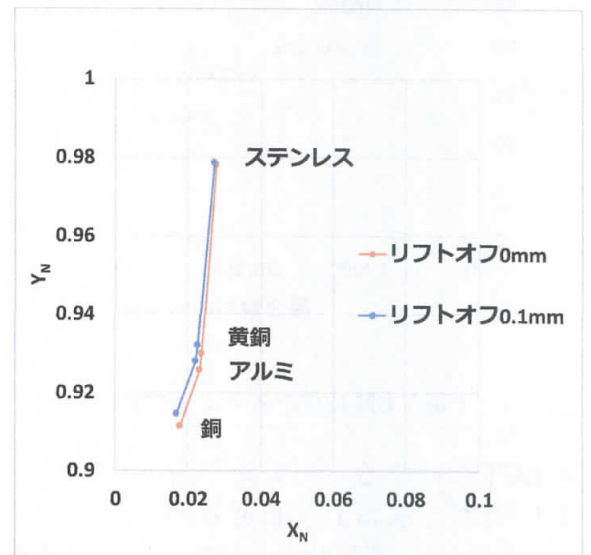


Fig.4 タンジェンシヤルコイル(4kHz)

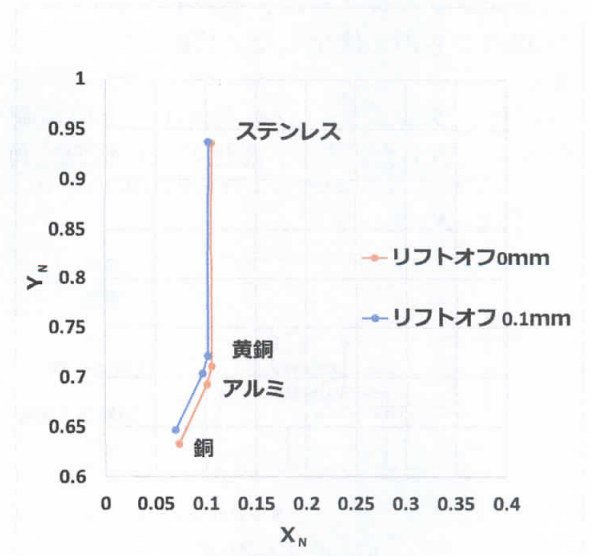


Fig.5 パンケーキコイル(4kHz)

試験コイルには交流電流を流しているの、周波数を高くすると電磁誘導現象のために渦電流の発生が活発になり、反発磁界が大きくなるためである。

次に、Fig.10に、Fig.9の $f = 40\text{kHz}$ の正規化インピーダンスを拡大したものを示した。磁化していないときも角度を変えるとリアクタンス成分が変化しているが、これは鋼板は圧延によって、その透磁率に異方性が生じることが知られている。また、磁化しているときに角度を変えるとリアクタンス成分が減少するのはローレンツ力の影響と考える。

Fig.11は、試験体を磁化し $f = 40\text{kHz}$ で測定したときの正規化インピーダンス $|Z_N|$ と角度のグラフである。このグラフは、角度 0 のときの Z_N を基準とし、角度が変化したときの Z_N の値との差 $|\Delta Z_N|$ を示している。角度が $\pi/2$ のときは変化量が多いことが確認できた。

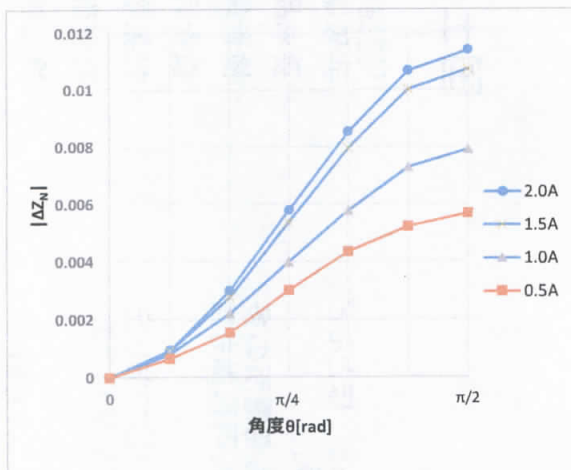


Fig.11 各電流における角度変化に対するインピーダンスの変化量

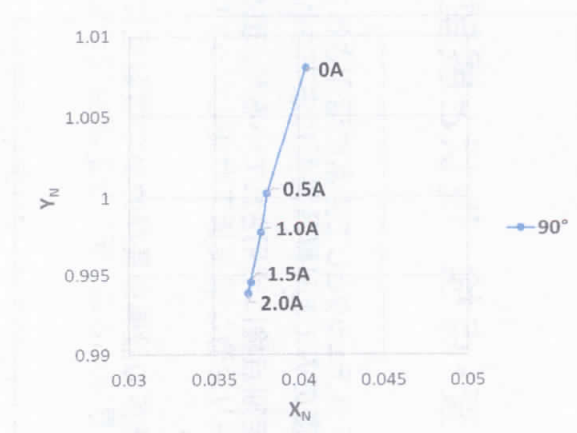


Fig.12 電流変化に対する正規化インピーダンス(40kHz)

Fig.12は、 $f=40\text{kHz}$ のときに直流磁化電流を変化させたものである。磁化電流が大きくなるにつれて、リアクタンス成分が減少することが確認できた。

Fig.13は、 $f=40\text{kHz}$ のときに正規化インピーダンスの変化量 $|\Delta Z_N|$ と電流の変化をグラフにしたものである。このグラフより、インピーダンスの変化量は 2.0A 付近でグラフの傾きが小さくなっている。これは試験体が磁気飽和に近づいていることを示している。

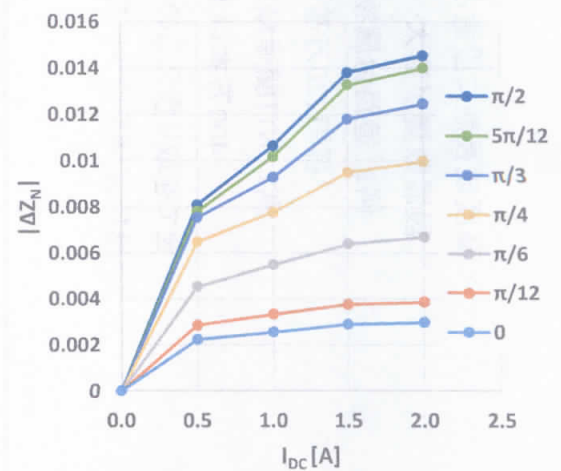


Fig.13 各角度における電流に対するインピーダンス変化量

5 まとめ

本研究では、タンジェンシャルコイルの性能評価とローレンツ力が渦電流試験に与える影響を検討した。タンジェンシャルコイルは、材質判別においてはパンケーキコイルとほとんどSN比が同じで、12dB増幅すれば同じように測定できることを確認した。また、渦電流と磁束密度の角度を変化させることにより、試験コイルのインピーダンスが変化することが確認できた。このことから、ローレンツ力が働いていると考えられる。

今後、渦電流をローレンツ力で制御して渦電流試験の高性能化を図る予定である。

「参考文献」

1)宮島、ファイマン物理学III電磁気学、岩波書店、p.p161-162 (1986)

埋設材路面境界部の 調査測定法の提案

～インフラ老朽化対策に即して～

(有)NS検査 代表取締役 新美久仁彦

現状及び今後の方向性

・高度成長期に設置されたインフラ関連設備が耐用年数を迎えている
設置数量が膨大

例1 道路付属物(標識・照明施設等)を見ると
標識220万基 + 照明350万基 = 570万基

例2 NTT関連鋼製電柱
400万本以上

全てを取り換えるのではなく合理的な点検を実施する事で適切な
維持管理を行う (非破壊による定期点検活用可)

非破壊検査・点検 現状と展望

- ・工業製品の不良チェックとして非常に活用されているが、ほとんど
が出荷時の1度のみであり製品需要に左右されてしまう。
- ・プラント等の定期点検に活用されているが、現在原子力発電所の多
くが停止しており急激な需要低下状態となっている。また再稼働も当
面見込めない。
- ・定期点検は既存の設備を長期的かつ複数回にわたる点検であり安
定した需要が見込める為、新たな定期点検の業務開拓が急務であ
る。
- ・今回これに変わるものがインフラ定期点検と言え、現在この分野で
ほとんど用いられていない為、非常に大きな新規業務開拓となる。

国土交通省における 本測定の考え方

- ・「道路付属物(標識・照明施設等)の支柱路面境界部以下の変状を
非破壊で検出できる技術」を公募
 - ・要求品質
 - ・検査条件 非破壊検査
 - ・検査時期 設置後10～20年以降
 - ・対象物 標識・照明施設支柱 50～500φ @2～12mm
 - ・検査部位 GL=0～-40mm -100mm程度までを要求
 - ・検出物 変状(変色以降の支柱残存板厚0.1mm単位)検出
管理・限界板厚支柱の検出
- __ 限界板厚 = 設計荷重に対して許容応力度を超過しない限界の板

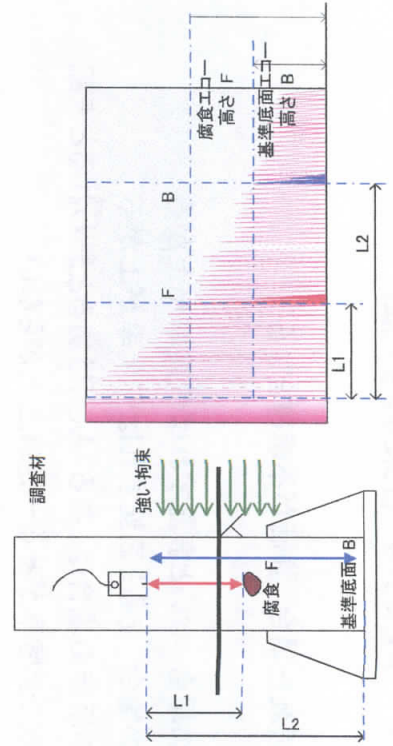
問題点

- ・ 測定対象物の材質・大きさ・形状・板厚・仕上げ……が様々
- ・ 更に 上記の情報が不明の場合が多い
- ・ 測定対象物が設置後20年以上で経年変化が起きている
- ・ 測定が屋外で障害物等もある場合があり 制約がある場合が多い
- ・ 埋設状況が様々 (土砂・AS・インタローッキング・コンクリート)
- ・ 地下部の状況が不明の場合が非常に多い
- ・ 変状検出の要求が極めて高い

超音波測定に於いて発生する現象

- ・ ノイズ(N)が大きく立ち上がる
- ・ 反射波(S)が得られないあるいは不明
- ・ 仮に反射波(S)が得られたとしても特定できない
- ・ 特定したとしても反射波(S)のエコー高さの定量性が不明

現象例



要求性能及び評価方法

- ・ 変状の検出 安全率を100%(危険率0%)とした上で 高合格率 (合格率90%以上と思われる)
 - ・ 変状があるものと評価 合格 合格率 合格率・安全率
 - ・ 変状がないものと評価 合格 合格率 合格率・安全率
 - ・ 変状がないものと評価 不合格 不合格率 安全率
 - ・ 変状があるものと評価 不合格 不合格率 危険率
- <不明確の場合 あると評価すれば合格率は下がるが安全率が上がる そのため合格率が上がらない>

現在の一般的な結果の評価

- ・現象が現れた場合 評価が不明確となる
 - ・不明確の場合 ないと表記すれば危険率が上がる
 - ・不明確の場合 あると表記すれば安全率が上がる
 - ・ゆえに不明確の場合はある もしくはあると思われると表記
 - ・そのために合格率がある一定以上上がらない
- <合格率を上げるためには ないものをないと表記することが必須>

対策1

超音波送受信量一定化の確保

- ・表面状態の処理
- ・送受信量の一定化(キャリアブレーションによる一定化)

現象の原因

- ・超音波が 測定物内|にどの程度送受信出来ているか不明
- ・探傷面の表面状態の悪さ等により 送信パルス以降ノイズ(N)が大きく表れる。
- ・埋設材の拘束による超音波の乱反射(N)、及び長期振動にさらされる事による材料結晶粒の粗大化と思われる乱反射波(N)により、ノイズが大きく現れる。
- ・変形状が超音波の入・反射角が受信センサーに帰ってこない角度となっている為 シグナル(S)が受信できない。
- ・ノイズ(N)とシグナル(S)の区別がつかない

対策2

ノイズ(N)対策

- ・二探触子化
- ・低周波数化
- ・RF表示化
- ・縦波の使用

対策3

反射波(S)を確実に捕捉

- ・ センサー接触安定化のための治具使用
- ・ 対象物に適合する周波数・サイズ・振動子の選定
- ・ 試験片の制定化によるエコー高さの定量化
- ・ 一般に反射波(S)が得られない角度に於いての超音波の受信化

対策4

ノイズ(N)と反射波(S)の識別化

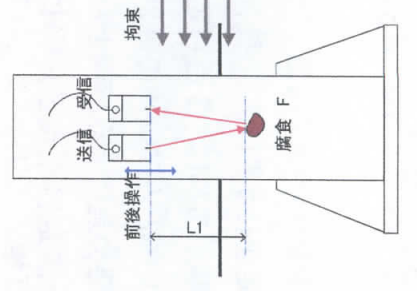
- ・ センサー移動に対する波形の移動形態を RF波形にて表示
- ・ 1測定地点を左右共 センサーを一定量移動させることで動きを確認しながら ノイズ(N)と反射波(S)を識別し、かつエコー高さの最高地点を検出
- ・ これを動画にて保存・確認・特定
＜1動画当たり64静止画 1地点当たり128静止画＞

得られた効果

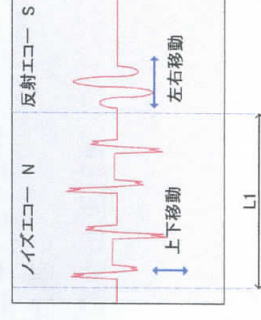
- ・ ノイズ(N)とシグナル(S)の識別化
- ・ エコー高さの定量化
- ・ 変状の見落とし防止

NSシステム

超音波反射法
2探触子
試験片動態評価
特許612419号
特許6385017号



超音波を各々のセンサーで送受信し、反射して受信した反射エコー高さSと、基準さすのエコー高さRの比で腐食の状態を評価する方法
ノイズが出る場合に於いて、エコーの動きにてノイズエコー-Nと反射エコー-Sを識別する



NS+システムの特徴

- ・埋設状況を選ばず 広範囲な対象物の測定が可能
(2~12mm 50φ~平板)
- ・ノイズ(N)の大幅な低減化
- ・キャリアプレーションを行うことで試験片きずとの対比化に成功
- ・エコーの動態変化で ノイズ(N)とシグナル(S)の識別化に成功
- ・低周波縦波の移動使用で 今まで受信できなかった波を捉えることに成功 かつ指向性が極めて広い事による 見落としの防止
- ・温度変化によるエコー高さへの低影響化

NS+システムの能力

- ・断面減少を%・mmで推定
- ・板厚測定を行う事により 残存板厚推定可能
- ・合否基準があれば 合否判定可能
- ・シグナル(S)とノイズ(N)の区別可能(見える化)
- ・移動形態の差による 客観性の確立
- ・128地点測定(1地点当たり)による圧倒的なエコー高さの情報量による最高地点におけるエコー高さを検出
- ・ 深度GL-100~300mmまでを検出
- ・変状の有無を断面減少率10%以上とすれば確実に検出可能
(各行政機関試験場及びフィールドに於いて90%以上の合格率)

NS+システムの現状での問題点

- ・低周波化により波長が長くなることによる測定地点のずれ
- ・移動により測定距離が変化することによる測定地点のずれ
- ・モード変換による反射波形の遅れによる測定地点のずれ
- ・位置特定に誤差が生じる(10-20mm程度の遅れ)
- ・断面減少10%未満の減肉は検出不可
- ・深度によりエコー高さの補正が必要
- ・断面減少が一定数以上となると定量性が曖昧になる
- ・動画保存によるデータ量が大きく重い
- ・測定時間が他の手法より長くなる

超音波 2探触子 反射法

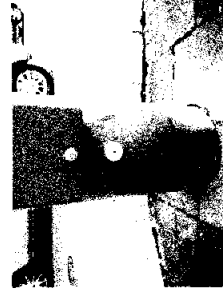
試験片方式 動態評価法

・特許第6124191号 特許第6385017号

・国土交通省

小規模附属物点検要領H29.3 に適合

・動画にてご確認願います



高精細X線CT装置を利用した高炉水砕スラグと砂利の混合比管理の調査研究

材料技術室 松岡 弘己, 細谷 昌裕

Study on mixing ratio management of Granulated blast furnace slag and gravel using X-ray CT scanner

Hiromi MATSUOKA and Masahiro HOSOYA

高炉水砕スラグ入り砂利の3次元CT像を撮影し、画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の混合比を管理する手法を確立する調査研究を行った。1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいにとどまる高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類を用意し、砂利に高炉水砕スラグを10, 25, 40, 55, 70%の重量割合で混合した試料を作製してマイクロフォーカスX線CT装置で測定を行った。測定した画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の体積を求めたところ、試料の重量割合と測定した体積割合に相関があるデータが得られた。混合前の高炉水砕スラグと砂利の粗粒率がわかれば、混合後の混合割合を知ることができるため、混合比管理に利用できる可能性があることがわかった。

1. はじめに

千葉県は、砂利生産量が全国2位であり、山砂生産量では全国1位である¹⁾。東京湾岸地域のコンクリート用細骨材(砂利)には、千葉県産が多く使用されている。

しかし、千葉県の砂利採取場では、近年、砂利の粒度が細くなり、粒度の粗い良質な砂利が採取できなくなってきている。粒度の粗い砂利を得るためには、新規採取場の開発を行うか、または、粒度が粗い砕砂やスラグ骨材の混合を行うことが必要であるが、これ以上の新規採取場の開発は、自然環境への負荷が懸念される。砕砂の混合は、硬質な岩石を砕いて砕砂を生産するため、加工のためのエネルギーが必要であり、また、東京湾岸地域近辺にコンクリートに適した岩石を採取できる場所が少ないため、運搬にコストがかかる。

スラグ骨材のうち、高炉水砕スラグは、千葉県に高炉が2基あり、水砕スラグが副産物として生産されているため、運搬コストが安い。また、製鉄における副産物であるために、廃棄物リサイクルの観点から環境負荷低減に貢献でき、且つ、高炉水砕スラグ細骨材は、潜在水硬性があり、コンクリートの強度増進に効果がある特徴がある²⁾。このように利点の多い高炉水砕スラグ細骨材だが、コンクリート用細骨材として、あまり利用されていない³⁾。利用されていない理由の1つとして、貯蔵時に固まる性質があることから、管理に手間がかかるこ

とが挙げられる。砂利と高炉水砕スラグ細骨材を混合すると固まりにくいことから⁴⁾、事前に混合することが良いことがわかっているが、混合後の混合割合を確認する手段がないため、企業取引における混合割合の保証を行うことができない。

そこでの混合割合を確認することができる手法を開発することにより、混合後の工程管理、受人管理に利用することができ、企業間取引における信頼性を確保し、高炉水砕スラグ入り砂利の製造・販売を促進することが可能となる。また、砂利採取業者が採取場で混合することにより、環境負荷が低く高強度なコンクリートを実現できる高付加価値な砂利を製造することが可能となる。

本研究では、高炉水砕スラグと砂利はX線減弱係数が異なることから、マイクロフォーカスX線CT装置を用いて高炉水砕スラグ入り砂利の3次元CT像を撮影し、画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の混合割合を管理する手法を確立することを目的として行った。

2. 実験方法

2.1 高炉水砕スラグと砂利の試料

高炉水砕スラグは、2製造業者から試料の提供を受け、試験に供した。内訳を表1に示す。

砂利は、コンクリート用骨材として出荷している製品とそれより粒度の細かい中目の砂利(3産地)を試験に供した。内訳を表2に示す。

表1 高炉水砕スラグの種類

スラグ	業者	種類
スラグ1	A	製品として出荷しているもの
スラグ2	B	製品として出荷しているもの

表2 砂利の種類

砂利	産地	種類
砂利1	君津市法木	製品
砂利2	市原市万田野	中目
砂利3	君津市吉野	中目

2.2 測定試料

高炉水砕スラグと砂利をJIS A 1102 骨材のふるい分け試験方法によりふるい分け、1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいにとどまるものを試料とした。

1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいをとどまるものを試料とすることにより、スラグの混合比率が低いときに、測定試料中の高炉水砕スラグ割合を高くする効果と、測定視野内の高炉水砕スラグと砂利の粒子数を多くする効果がある。

ふるい分けを行った3種類の砂利に、2種類の高炉水砕スラグを重量割合で10,25,40,55,70%混合して25gとなるようにはかり取った。この混合割合は、砂利に高炉水砕スラグを5~30%混合した場合の1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいを留まるものの高炉水砕スラグの割合に相当する。はかり取った試料を50mlプラスチック容器に入れ、10分間マイクロブローターで混合を行った。

混合した試料は、プラスチックの中で密度が低く、X線を透過しやすい15mlポリプロピレン製試験管に入れて測定用試料(写真1)とした。

2.3 真密度測定

前処理として、高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類(1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいをとどまるもの)を真空デシケータで真空引き(30分)を行った。

真密度は、密度・比重測定装置(ペンタピクノメータ、カンタクローム製)を用いて、サンプルセルに入れた試料の質量を測定してから真体積の測定し、試料の質量と真体積より、計算した。サンプルセルは容量135ml、測定ガスにヘリウムを使用した。

2.4 測定

試料容器を3爪チャックで垂直に固定し(写真2)、マイクロフォーカス X 線 CT 装置(TDM1000H-11(2K)、ヤマト科学(株)製)で測定を行った。測定は、実際に企業が品質管理に用いることを考慮し、1回の測定が1時間以内で終了し、高炉水砕スラグと砂利のコントラストの違いがはっきりする測定条件(表3)で測定を行った。

1回目と2回目の測定位置と範囲を写真3に示す。1回目の測定は、測定視野が試料だけになり、容器と試料が接している所が入らないように測定を行った。2回目は出来るだけに多くの試料が視野に入るように測定容器を含めて測定を行った。

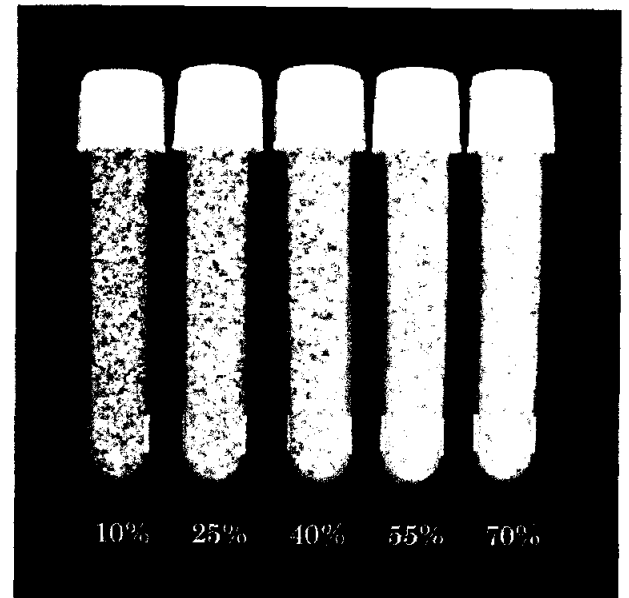


写真1 測定試料



写真2 測定風景

表3 測定条件

CTスキャン条件	
X線管電圧	80 KV
X線管電流	110 uA
検出器の露光時間	0.100 秒
ビュー数	1500
フレーム平均数	20
ステップスキャン	あり
再構成条件	
XYマトリックス	1024
分解能	空間分解能優先
RFC処理	高精度
視野はみ出し補正	なし



写真3 測定位置と範囲

2. 5 混合割合(体積)の計算

CT 測定データの解析には、図1に示す VG STUDIOMAX(ボリュームグラフィック製)を使用して、混合割合(体積)の計算を行った。

測定データ外周部分の偽像が発生した部分を削除した後、測定画像の明るさとそれらの度数を示したヒストグラムの谷を区切りとして、バックグラウンド、砂利、高炉水砕スラグと定義した。定義した砂利と高炉水砕スラグの体積を計算させ、高炉水砕スラグと砂利の体積割合を求めた。

3. 結果及び考察

3. 1 真密度測定結果

1.2mm ふるいを通過し、0.6mm ふるいに留まる高炉水砕スラグ 2 種類と砂利 3 種類の真密度測定結果を表4に示す。

高炉水砕スラグと砂利の真密度は0.15 g/cm³以上の差があり、この差が高炉水砕スラグと砂利の3次元CT像におけるコントラスト差の原因となることが確認できた。

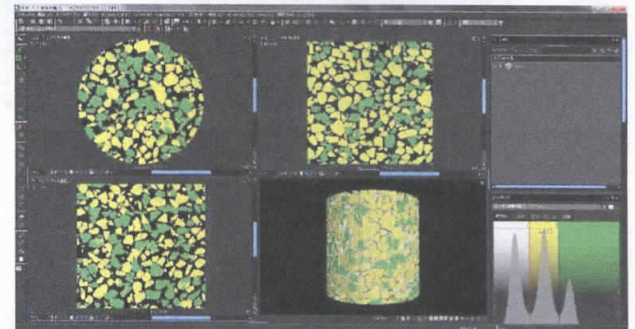


図1 VG STUDIOMAX

表4 真密度と粗粒率

スラグ	真密度 (g/cm ³)
スラグ 1	2.875
スラグ 2	2.838
砂利 1	2.651
砂利 2	2.669
砂利 3	2.675

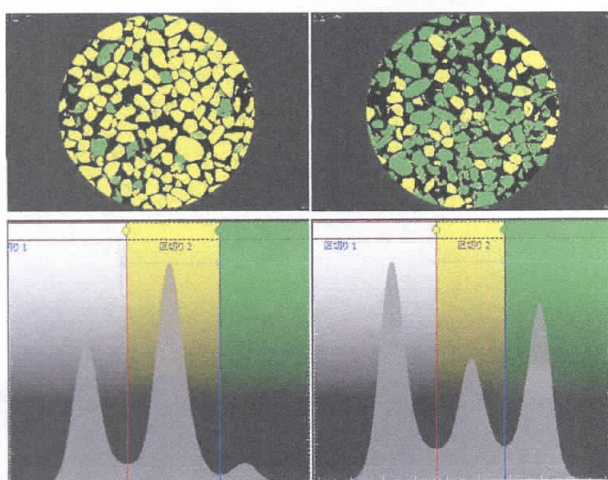
3. 2 測定結果

測定結果の例として、混合割合 10%及び 70%の
スラグ 1 と砂利 1 についての断面画像及びヒスト
グラムを図 2 に示す。

ヒストグラムは、左の山からバックグラウンド、砂
利、高炉水砕スラグに該当する測定画像の明るさ
を示している。

断面画像は、ヒストグラムの谷を区切りとして、
輝度の暗い部分が砂利で明るい部分が高炉水砕ス
ラグを示している。

このヒストグラムから、10%混合でも高炉水砕
スラグのピークを確認できた。



(a) 10% (b) 70%

図 2 断面画像とヒストグラム

3. 3 断面画像

混合砂利 1～3 の断面画像を図 3～5、スラグ
1 と 2 の断面画像を図 6、7 に示す。

図 3～5 より、砂利の部分にバックグラウンド
と高炉水砕スラグと認識している部分がある。砂
利は、さまざまな鉱物から構成されているため、砂
利の粒子中に密度の高い部分と低い部分が存在す
るためと考えられる。

図 6、7 より、高炉水砕スラグには空洞があり、
スラグ 1 よりスラグ 2 の方が空洞の個数が多い。
また、空洞の周りや高炉水砕スラグの外周に砂利
と同じ輝度の部分がある。



図 3 砂利 1 の断面画像 (10%スラグ 1 と砂利 1)

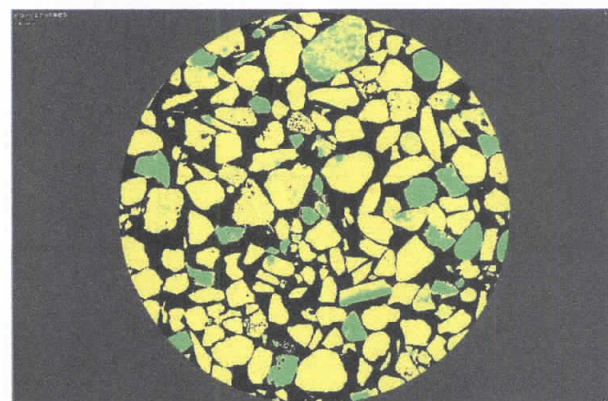


図 4 砂利 2 の断面画像 (10%スラグ 1 と砂利 2)



図 5 砂利 3 の断面画像 (10%スラグ 1 と砂利 3)

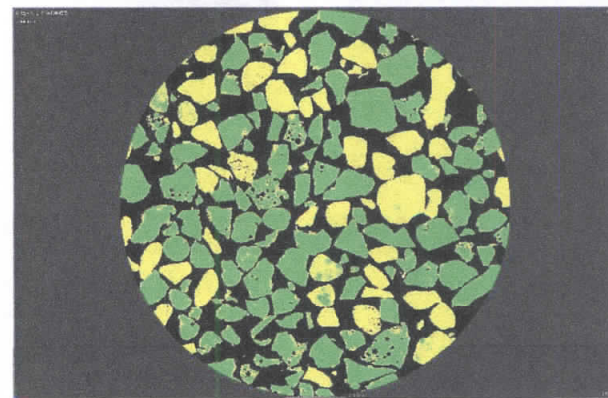


図 6 スラグ 1 の断面画像 (70%スラグ 1 と砂利 1)

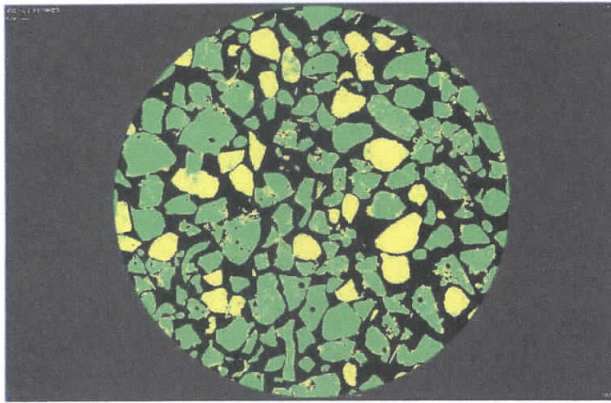


図7 スラグ2の断面画像(70%スラグ2と砂利1)

3. 4 測定割合(体積)の計算結果

混合割合(重量)とX線CTによる測定割合(体積)を比較したところ、相関があることが確認できた。この結果を図8に示す。

また、同じ混合割合(重量)の測定から計算した測定割合(体積)は、5%~9%異なった。計算した測定割合(体積)の近似曲線は、実際の混合割合(重量)より低い値を示し、かつ高炉水砕スラグの混合割合が多くなるほど低い値を示した。これは、再構成条件のXYマトリックスを1024に設定しているため、測定範囲に含まれる境界面が多くなるほど、高炉水砕スラグの縁が砂利と認識されるためと考えられる。高炉水砕スラグと砂利の縁の画像を図9に示す。VG STUDIOMAXの断面画像は、通常、補間モードありのため、縁がなめらかに表示されるが、補間モードなしの断面画像は、高炉水砕スラグの縁がバックグラウンドとの中間色となっており、この部分が砂利と認識されると考えられる。

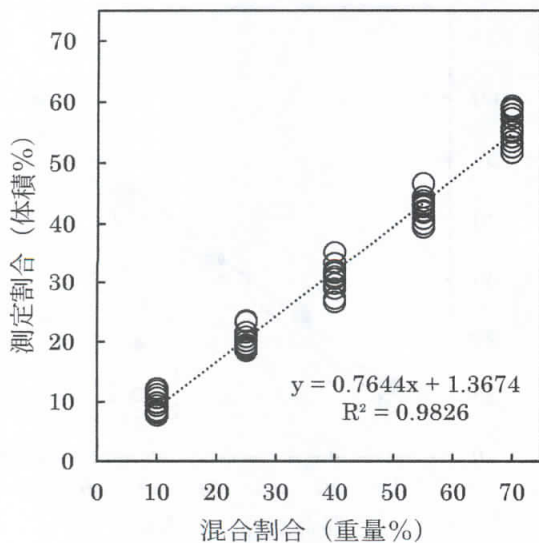


図8 全測定の計算結果

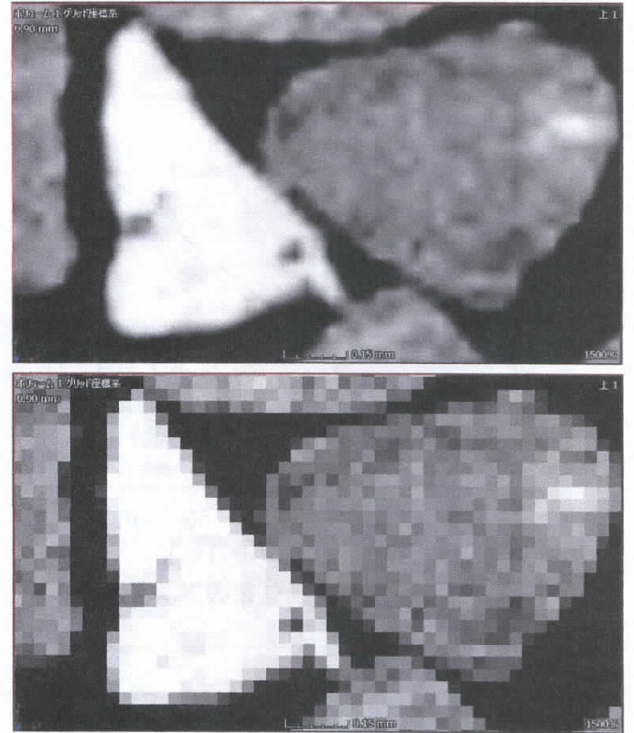


図9 補間モードあり(上)と補間モードなし(下)

高炉水砕スラグと砂利の組合せ別に、混合割合(重量)と1回目および2回目の測定割合(体積)を計算した結果を図10~15に示す。

1回目は、スキャン直径が約10.9mm、2回目は、スキャン直径が約14.6mmの範囲で測定を行っている。すべての組合せで、1回目の測定より2回目の測定で測定割合(体積)が低くなることから、撮影範囲が測定割合(体積)に影響を与えていると考えられる。

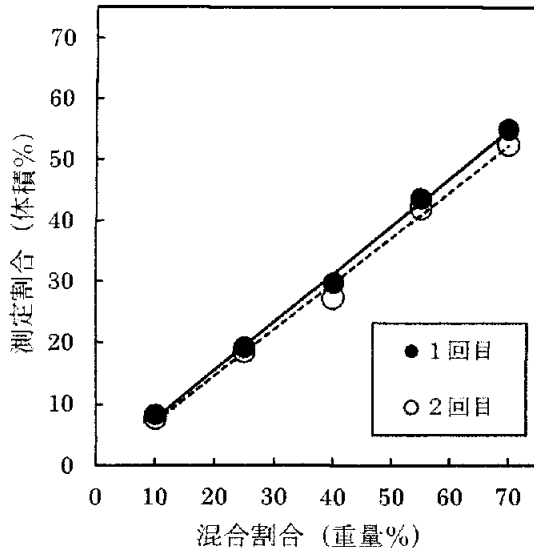


図10 砂利1とスラグ2の計算結果

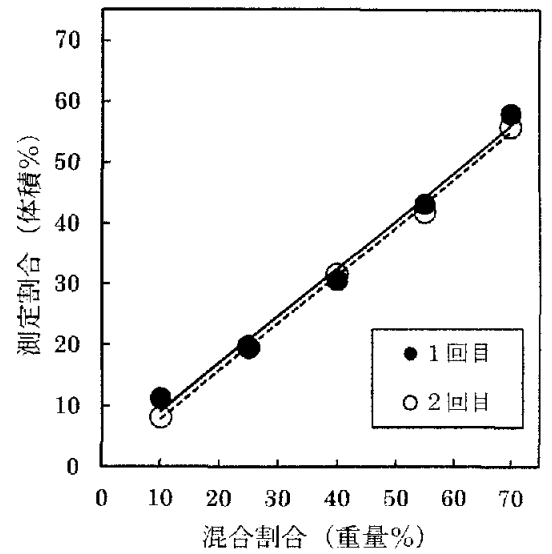


図13 砂利2とスラグ2の計算結果

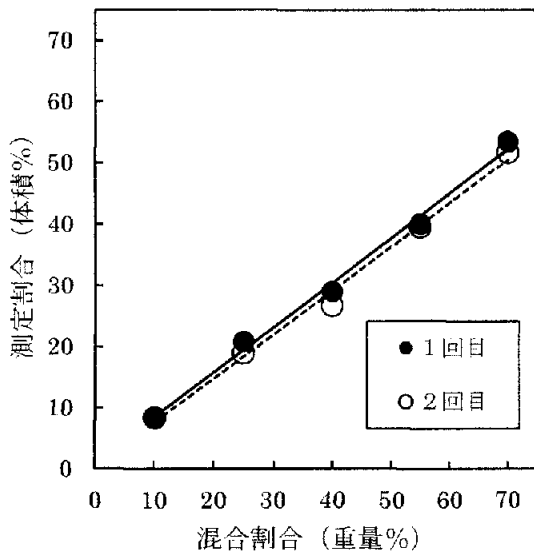


図11 砂利1とスラグ2の計算結果

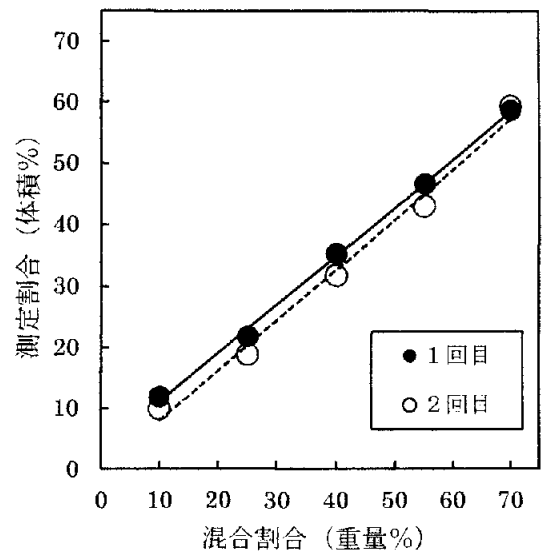


図14 砂利3とスラグ1の計算結果

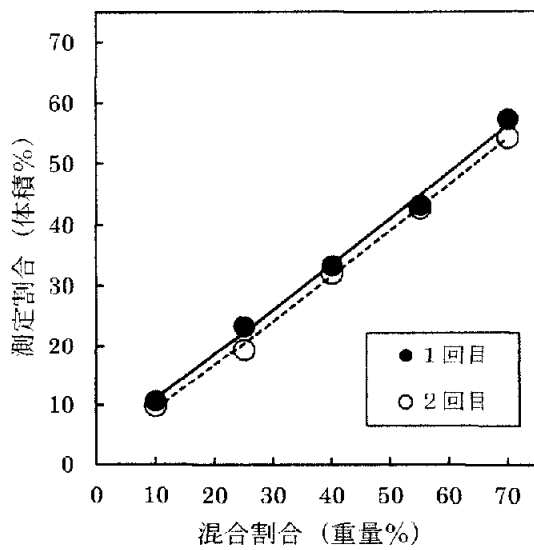


図12 砂利2とスラグ1の計算結果

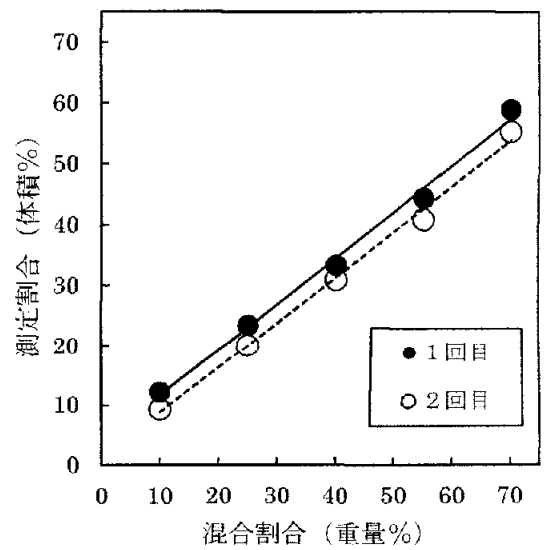


図15 砂利3とスラグ1の計算結果

図10～15の1回目および2回目を平均した結果を図の16に示す。

測定割合(体積)は、同じ高炉水砕スラグより同じ砂利の方が近い値をとることから、高炉水砕スラグを変えるより、砂利の種類を変えることの方が測定割合(体積)に大きく影響を与えている。

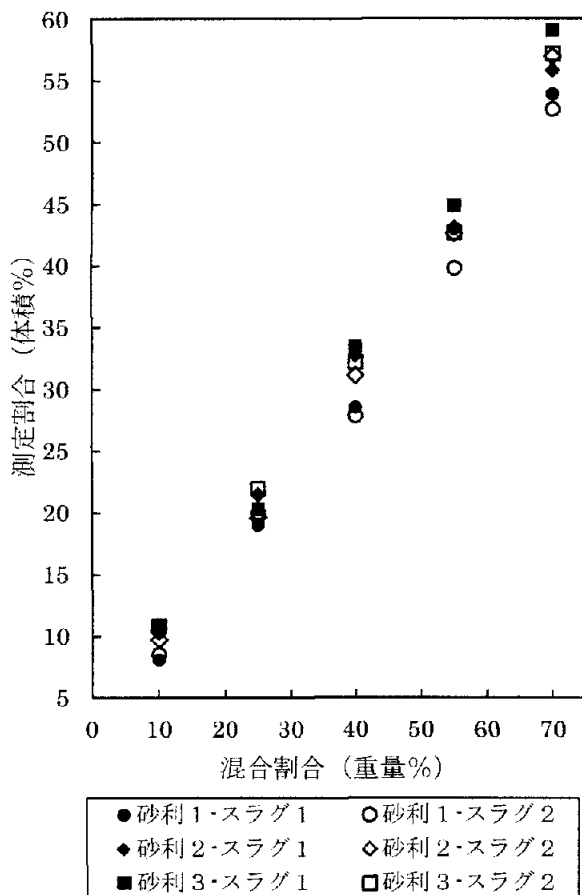


図16 砂利とスラグの組合せ別の結果

4. まとめ

本研究では、1.2mmふるいを通過し、0.6mmふるいにとどまる高炉水砕スラグ2種類と砂利3種類を用意し、砂利に高炉水砕スラグを10, 25, 40, 55, 70%の重量割合で混合した試料を作製した。その試料をマイクロフォーカスX線CT装置で測定を行い、測定した画像のコントラスト比から高炉水砕スラグと砂利の体積を求めた。その結果は、以下のとおりである。

- (1) 混合割合(重量)とX線CTによる測定割合(体積)に相関があることがわかった。混合前の高炉水砕スラグと砂利の粗粒率がわかれば、混合後の割合を知ることができるため、混合比管理に利用できる可能性がある。
- (2) 計算した測定割合(体積)の近似曲線は、実際の混合割合(重量)より低い値を示し、高炉水砕スラグの混合割合が多くなるほど低い値を示した。
- (3) 測定時の撮影範囲を大きくすると測定割合(体積)が低くなった。
- (4) 高炉水砕スラグと砂利では、砂利の違いのほうに測定割合(体積)に影響を与えた。

参考文献

- 1) 平成28年度砂利採取業務状況報告書集計表, 経済産業省製造産業局素材産業課, 国土交通省水管理・国土保全局水政課, 2-6 (2018)
- 2) 鉄鋼スラグのコンクリート骨材への利用, 鉄鋼スラグ協会, 11 (2004)
- 3) 平成29年生コンクリート統計年報, 経済産業省製造産業局素材産業課, 52-55 (2018)

CNDI 鉄骨溶接部超音波探傷回送実験のその後

立川 NDT テクノ 立川克美

概 要

2018年9月6日、一般社団法人日本非破壊検査協会では2件の非破壊検査協会規格 (NDIS) が制定された。

・NDIS 2432：角形鋼管溶接角部の超音波探傷試験方法

・NDIS 2433：裏当て金付完全溶込み溶接T継手のルート部からのエコー判別方法

これらのNDISは、NDI指針として制定されていたものであるが、一般社団法人日本建築学会が制定する「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説」（以下 建築学会規準）の2018年改正に合わせてNDIS化したものである。

この2件のNDISは千葉県非破壊検査研究会及び千葉県産業支援技術研究所にとって関連深い規格である。これを機に研究会の歴史に遡って解説を加えることにする。

1. はじめに

千葉県非破壊検査研究会 (CNDI) は、昭和56年 (1981年) 5月にスタートして以来、今年で38年を迎える。研究会の設立目的は、会員相互のNDT技術の向上、情報交換及び親睦交流を図ることとし、会則には①研究会 ②情報交換会を行うと明記されている。

この趣旨に従い、研究発表会、特別講演会、技術講習会、資格試験のための講習会、見学会、NDTテクノ談話室などの多彩な行事が営まれてきた。

なかでも、NDI認定又は認証関係の講習会はUT, PT, MTなどCNDIの設立当初から盛んであった。特に協同組合千葉県鉄骨工業会 (以下CTK) からは鉄骨製作工場の大員認定に係るUT資格者養成が要望され、当時の機械金属試験場 (現千葉県産業技術支援研究所) で、白井越朗氏 (元会長、現CNDI顧問) が主となってその教育に当たった。その結果、多数のUT2級 (昭和62年までは資格の呼称は”級”) 技術者が誕生した。

しかし、CTKの教育担当者から、鉄骨ファブリケータでUT資格を取得する技術者は、日常的には他の鉄骨制作業務を行っている方で、会社でUT検査をする機会はほとんど無いのが実情ある。従って、資格を取得しただけでは探傷技術そのものを忘れてしまうため、継続的に探傷技術を維持することを目的にUTの勉強を行う機会を作りたいとの要望が出された。

そこで、超音波探傷技術の勉強会グループを発足させることとなった。このグループが手がけた角形鋼管角部の超音波探傷試験の成果が、後のNDI指針作成に繋がることになった。

2. NDI指針：角形鋼管溶接角部の超音波探傷試験方法制定の経緯

昭和55年頃は、鉄骨製作工場におけるUT資格の取得が盛んな時期であった。その数年後には、JSFA (全国鉄構工業協会) の鉄骨検査技術者の認定がスタートした頃でもあ

り、筆者にとっても UT 技術は駆け出しの頃で、この勉強会で一緒になって探傷技術を学んだ記憶がある。

この勉強会グループでは、当初は突合わせ溶接部の欠陥検出と建築学会規準に基づく評価をテーマとしていたが、参加者の中から、角形鋼管柱（コラム柱）の角部の探傷は可能かとの質問があり、勉強会グループの3年日からは、角形鋼管角部の探傷をテーマとして共同で実験を行うこととした。

当時の建築学会規準では角形鋼管の UT 探傷規定はなく、JIS Z 3060:1988「鋼溶接部の超音波探傷試験方法」においても、附属書 2（円周継手溶接部の探傷方法）では、適用範囲は探傷面の曲率半径が 50mm 以上 1000mm 未満の円周継手溶接部とされていた。このため、角形鋼管溶接角部に適用する UT 規準は無かったのが実状である。

このため、鉄骨製作現場では、検査の対象外となる角部に溶接始末端部を置く施工方法をとっていた。角形鋼管の角部は構造的に応力集中の起きる箇所であるにもかかわらず、溶接欠陥の生じやすい始末端を角部に置くような施工法は、許容できるものではない。

3. 研究グループの実験方法及び結果

本実験は回送実験方式とし、表 1 に示す参加者の中で、試験体を回送し、データは機械金属試験場にて集計し、結果をまとめた。

実験の詳細は、CNDI のホームページの「研究報告」の欄、平成 4 年（1992 年）の第 6 回研究発表会に掲載されている。

ここでは、図 1 に示す試験片に加工した角部の $\phi 4 \times 4$ と平板部の $\phi 4 \times 4$ との感度差や、表 2 に示す板厚の角部に加工したきず指示長さについて実験したもので、その結果を表 3 に示す。

表 1 第 5 回鉄骨超音波回送実験参加者

氏名	所属
永井 勉	(株)キミツ鐵構建設
仙波一清	(株)キミツ鐵構建設
小野田莞爾	(株)富士商事
石渡 昇	(有)秋元鐵構建設
椎名英男	(株)若柴工業
富岡 雄三	(株)若柴工業
前田幸生	(株)若柴工業
大賀 信之	(株)クマガイ
藤ヶ崎 修	(有)粉口製作所
川宮誠治朗	平山鉄構建設(株)
立川克美	千葉県機械金属試験場

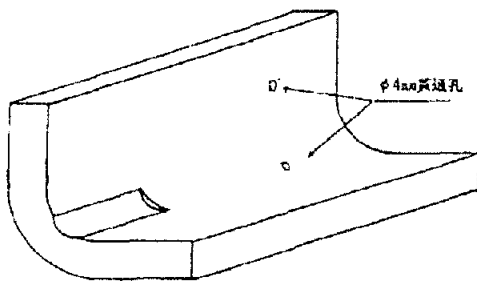


図1 試験体

表 2 角形鋼管試験体寸法

板厚(mm)	外側半径(mm)	内側半径(mm)
12	29.7	18.7
16	38.0	18.8
19	49.6	29.9

表3 STB-A2 φ4×4との感度差

板厚(mm)	外側半径(mm)	角部との感度差(dB)	平行部との感度差(dB)
12	29.7	-10.5	-1.0
16	38.0	-11.5	-1.5
19	49.6	-14.5	-3.0

4. JSNDI 202 研究委員会の実験とその後の経緯

1993年になって、JSNDIの202研究委員会でも角形鋼管角部のUT方法が課題となり、WGが組織された。CNDIの研究報告が先行していた関係で、研究会のレポートを基礎として、市場に流通している角形鋼管の板厚及び角部のrごとの試験体数を増やすと共に、スリットきずは放電加工とし、本格的な研究へと移行した。

1995年には最初の指針「角形鋼管柱溶接角部の超音波探傷試験方法に関する指針」が提案された。しかし、当時は(社)鋼構造協会における角形鋼管の板厚と角部のrとの関連規格化されておらず、メーカーごとに異なる値であったが、その後規格化されたため、1996年に改正版として再発行され、この指針は建築学会規準の1996年版に付録として取り込まれた。

建築学会規準は、2008年の改正時に適用板厚の下限値をそれまでの9mmから6mmに下げた経緯があり、今回の2017年建築学会規準改正作業の中で、角形鋼管角部のUT適用範囲拡大の要望がJSNDIに提出された。これを受けて202研究委員会の後継委員会である接合部の超音波探傷研究委員会にて追加実験を実施した。なお、JSNDIでは学術委員会の規則改正で、「指針」の制定はしておらず、テクニカルレポート又はNDISの制定に限るとされている。そのため、本指針は、NDIS 2432「角形鋼管溶接角部の超音波探傷試験方法」として2018年9月6日に制定され、2018年12月15日発行の建築学会規準2018年版に掲載された。

《NDIS 2432 規定の一部》

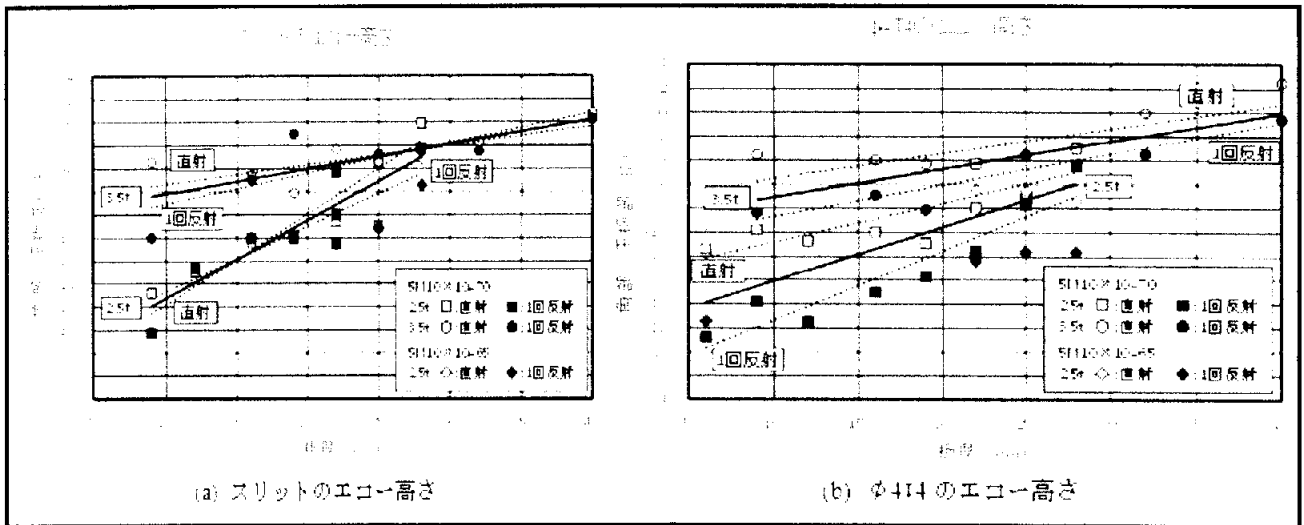
8.4 探傷感度

A2形系標準試験片又はA3形系標準試験片のφ41.4mmのニモ一高さを、公称屈折角70°ではH線に、公称屈折角65°ではM線に合わせた後、曲率半径の標準値によって表1に示す感度補正を行い、これを探傷感度とする。

表1-感度補正

r: 板厚

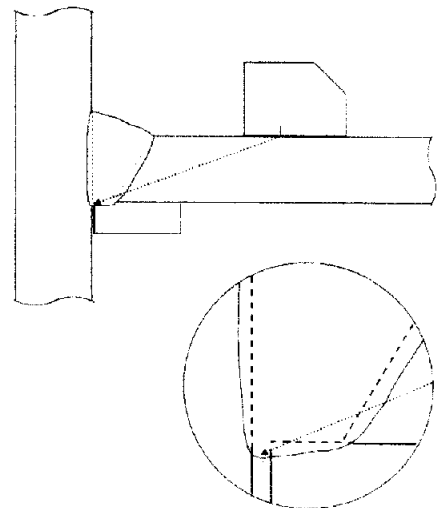
曲率半径の標準値	板厚 mm	感度補正量 dB	
		公称屈折角70°	公称屈折角65°
2.5r	6以上22以下	+10	
	22を極え28以下	+4	-6
3.5r	9以上22以下	+4	
	22を極え40以下	0	



5. NDIS 2433 「裏当て金付完全溶込み溶接 T 継手のルート部からのエコー判別方法」

建築鉄骨の柱仕口溶接部は、その多くがレ形開先の裏当て金付きの T 継手溶接部で施工されている。この初層溶接部において、裏当て金と縦フランジの隙間があると、図 2 に示すような溶接部先端からエコーが受信される。この部分は一般に「たれ込み」と称されている。

たれ込みは板厚よりも深い位置にあり、欠陥ではないものの、超音波探傷試験結果ではルートの溶込み不良のビーム路程とほとんど同じになることから、両者の判別については、現場的にはトラブルの元となっている。



たれ込み部

図 2 たれ込み部

この問題を解決するために、1981年に JSNDI の 202 小委員会（岸上守孝委員長）から「裏当て金付完全溶込み T 継手のルート部からのエコー判別に関する指針」が発表された。しかし、この初期の指針は、探傷現場において、その判別結果に疑義や差異が生じた場合に適用するとしていたことや、その解釈について誤解と曲解が生じたため、十分に活用されなかった。

これらの問題を解決するため、1993～1995年に掛けて大規模な実験を行い、1995年改訂版として発表した。この1995年指針の改訂版の実験については、当時の千葉県機械金属試験場を会場として、多くの集合実験を繰り返し、1000を超える探傷データと確認のための切断マクロ試験は100カ所以上に及んだ。その結果から導き出した判別法を図3及び図4に示す。この結果は、角形鋼管角部の探傷と同様に1996年版の建築学会規準に取り込まれたところである。

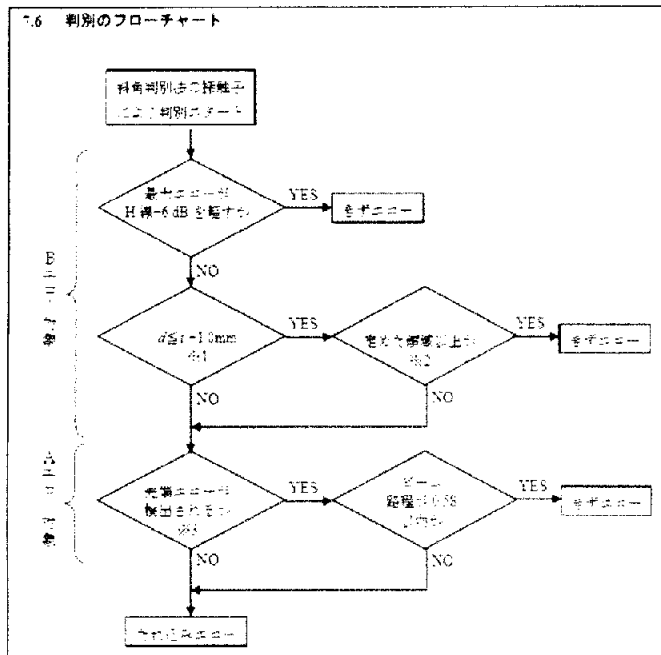


図3 斜角判別法による判別のフローチャート

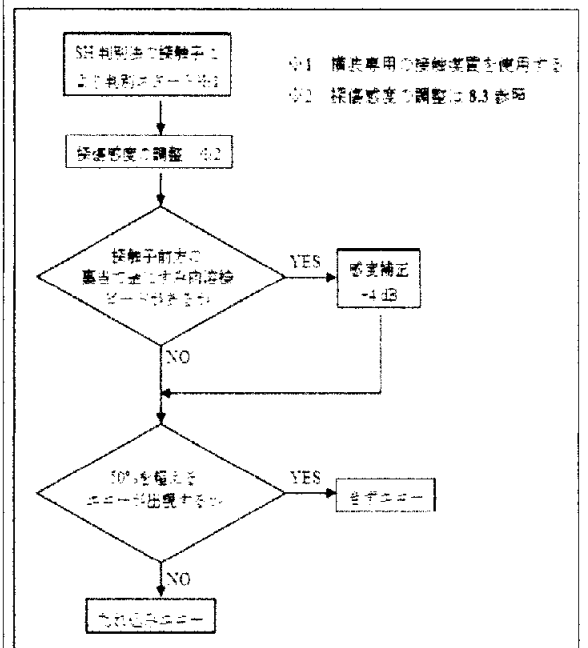


図4 SH判別法のフローチャート

1995 改正版では、実験に使用した超音波探傷器は当時のアナログタイプ探傷器であった。きずとたれ込みの判別については、先端エコー（きず先端の端部エコー）の確認も重要な要素となっており、これが現在では主流となったデジタル探傷器においても、図5及び図6に示す先端エコーが確認できるか否かが問題となった。そこで、今回のNDIS化に当たり、たれ込みときずの試験体を作製し、確認実験を行った。

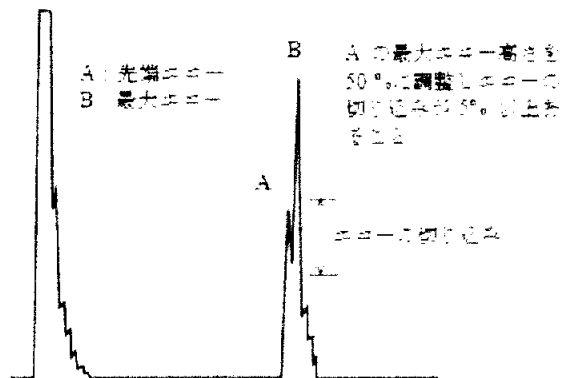


図5 先端エコーの探傷図形

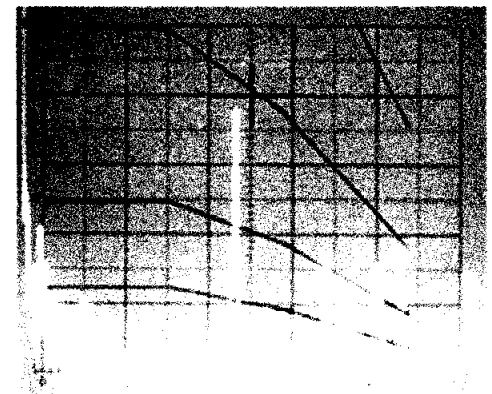


図6 アナログ探傷器の探傷図形
使用探触子 5Z10X10A65

デジタル探傷器においては、機種により画面解像度が異なり、測定範囲 250mm では先端エコーが認識できないものもある。しかし、デジタル探傷器では各機種共に部分拡大機能（ズーム機能）を備えており、この機能を用いれば、先端エコーを確認することができ、図3に示したフローチャートによる判別が可能であることを確認した。

建築学会規準には、判別のフローチャートが中心に書かれているが、JSNDI 発行の NDIS

には解説文を含めて詳細に記述している。建築鉄骨溶接部の探傷技術者は是非とも読んでいただきたい規格であると共に、レベル3を目指す技術者には必読の規格である。

6. まとめ

今回の NDIS 2432 及び NDIS 2433 制定作業に際し、両規格の元となった指針の作成段階で、千葉県非破壊検査研究会が大きな役割を果たしたことが、改めて再認識した次第である。平成3年頃のバブル期までは、製造業や非破壊検査業界も非常に活性化していた時代で、研究委員会への参加希望者が多く、定員内に押さえ込むのに苦勞した時代であった。実験を行うにはそれなりの資金が必要であるが、NDIからの予算措置は皆無で、実験費用は参加者のボランティアで成り立っていた。当時は参加者の企業が理解を示していただき、資金面での苦勞はあり得なかった。当研究会においても、可能な範囲で協力したところである。

しかし、今日の業界を見ると、このような実験や研究に対する理解が得られにくい状況に陥っている。JSNDIにおいても、各種の研究会は閉店休業状態で、この NDIS のルーツである 202 研究委員会の流れをくむ接合部の研究委員会も年々参加者が減少し、昨年その幕を閉じた。

このままの状態が続けば、国内産業界の超音波探傷技術の衰退を招くことは必至であると危惧している。当研究会としても知恵を出し、会員相互の技術向上策を考えて行きたい。

参考文献

1. 千葉県非破壊検査研究会：第6回研究発表会，平成4年，「角形鋼管溶接部の超音波探傷試験，回送実験による探傷結果」
2. (一社)日本非破壊検査協会：角形鋼管溶接部の超音波探傷試験方法に関する指針（1996改正）
3. (一社)日本非破壊検査協会：裏当て金付完全溶込みT継手のルート部からのエコー判別方法に関する指針（1995改正）
4. (一社)日本建築学会：鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説（1996, 2008, 2018）
5. (一社)日本非破壊検査協会：NDIS 2432：角形鋼管溶接角部の超音波探傷試験方法
6. (一社)日本非破壊検査協会：NDIS 2433：裏当て金付完全溶込み溶接T継手のルート部からのエコー判別方法

特 別 講 演

AI 技術によるひび割れ自動検知を活用した
コンクリート構造物の画像ベース点検

株式会社 東設土木コンサルタント 事業推進部
営業統括グループマネージャー 多田 佳史 氏

AI技術によるひび割れ自動検知を活用した コンクリート構造物の画像ベース点検



多田 佳史

画像ベース点検とは

- インフラ構造物の点検を、近接目視ではなく、
画像をベースとして行う点検で、
①撮影 ②画像処理 ③変状検知 からなる



車載カメラでトンネル壁面撮影



一眼レフカメラで橋梁床版撮影

概要

- 画像ベース点検とは
 - 東設土木コンサルタントの15年以上の取り組み
 - 画像ベース点検のメリットと課題
- AI技術導入による新・画像ベース点検
- 今後の展望

画像ベース点検 ①撮影

- 各種撮影手法で、構造物を撮影する
 - I. 走行型トンネル撮影
 - 供用中のトンネル向け
 - II. 揺動制御型撮影
 - 波による揺れで記録精度が悪くなる構造物向け
 - III. 近接自動撮影
 - 人の入れない狭隘部向け
 - IV. 遠方自動撮影
 - 大型または高層構造物向け

I. 走行型トンネル撮影

- 複数台のビデオカメラおよび照明等をトラック、台車等に搭載し、走行しながらトンネルを撮影
 - ひび割れ幅0.2mm程度を抽出可能な画像を撮影



道路トンネル
トラック(時速80km)



II. 振動制御型撮影

- 振動制御装置に搭載したデジタルビデオカメラにより、小型船舶から港湾構造物を撮影し、コンクリート表面を画像化
- 風や潮流による揺動を制御しながら撮影するため、地上部で撮影したような鮮明な画像を得ることができる
- 対象事例
 - 護岸、栈橋下面



撮影状況



護岸壁面



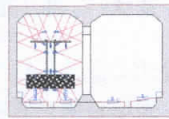
栈橋下面

I. 走行型トンネル撮影

- 複数台のビデオカメラおよび照明等をトラック、台車等に搭載し、走行しながらトンネルを撮影
 - ひび割れ幅0.2mm程度を抽出可能な画像を撮影



鉄道トンネル
モーターカー(時速20km)



模式図



鉄道トンネル
トロック(時速2-3km)



ガス導管シールド
台車(時速2-3km)

III. 近接自動撮影

- デジタルカメラを高層構造物の壁面に沿って吊り下げて、近接撮影によりひび割れ等を画像化
- 対象事例
 - 橋梁(橋脚)、建屋壁面

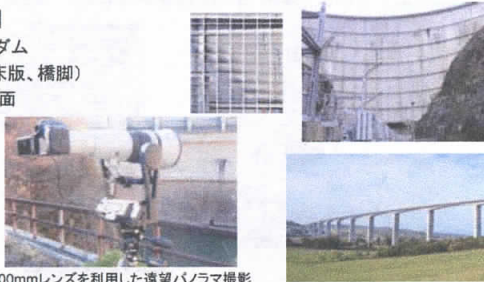


IV. 遠方自動撮影

- 一眼レフカメラ、望遠レンズ、自動雲台等により高層構造物を遠方から撮影し、コンクリート表面のひび割れ等を画像化
 - 撮影距離100m時：抽出可能ひび割れ幅0.2mm
 - 撮影距離200m時：抽出可能ひび割れ幅0.3mm

対象事例

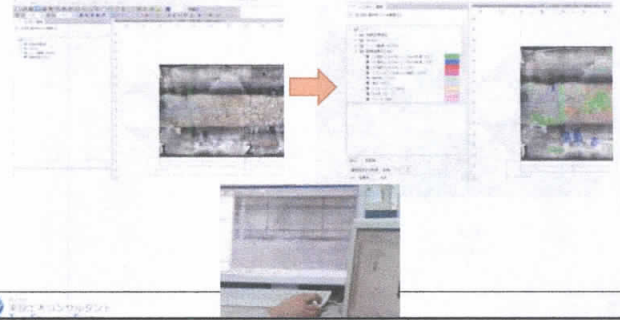
- アーチダム
- 橋梁(床版、橋脚)
- 建屋壁面
- 煙突



600mmレンズを利用した遠望パノラマ撮影

画像ベース点検 ③変状検知

- 撮影・画像処理を経て得た画像を、変状展開図作成・管理支援ソフト「CrackDraw21」に取り込み、変状を人が目視検知し、マウスでトレース

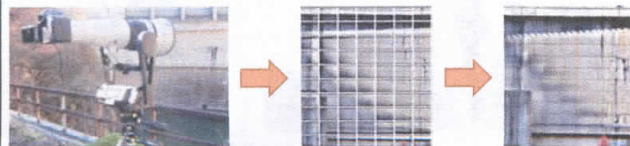


画像ベース点検 ②画像処理

- 撮影した画像データから、展開図を作成する
 - 動画データから静止画データへの変換



- 静止画データ群のステッチ合成とあおり補正




画像ベース点検のメリット

- **品質確保**
 - 変状記録の正確性(位置・幅・長さ)の向上
 - 変状(初期欠陥・劣化・損傷判別)の進行性確認
- **費用削減**
 - 現場日数を低減(現場規制等の影響を抑制)
- **未点検箇所解決**
 - 接近・肉眼目視困難箇所の点検可能化
 - 安全性の向上

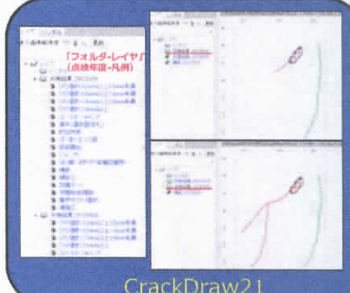
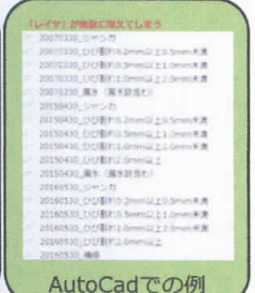
画像ベース点検で品質確保

- 変状記録の正確性(位置・幅・長さ)の向上
 - 画像トレースで変状が記録されるので、現場スケッチより正確
- 変状(初期欠陥・劣化・損傷判別)の進行性確認
 - 過去データとの比較・重ね合わせが容易



年度管理 ~CrackDraw21の特徴~

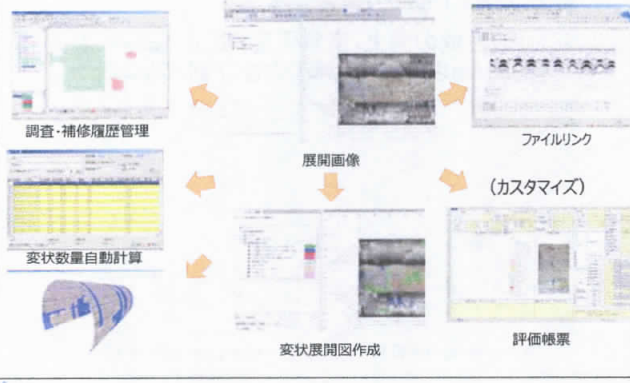
「フォルダ・レイヤ」構成で、煩雑になりがちな変状図の年度管理、補修履歴管理をシンプルに行うことができます。

CrackDraw21 AutoCadでの例

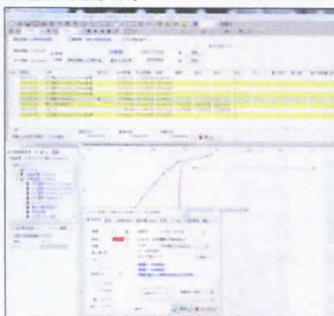
シンプルな年度管理で、変状の進行を的確に管理できます。

変状展開図作成・管理支援ソフト CrackDraw21



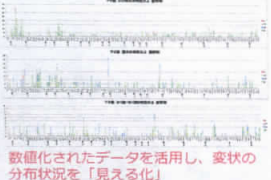
変状のデータベース化 ~CrackDraw21の特徴~

CrackDraw21に入力した変状は全て数値化され、データベースとして扱うことができます。



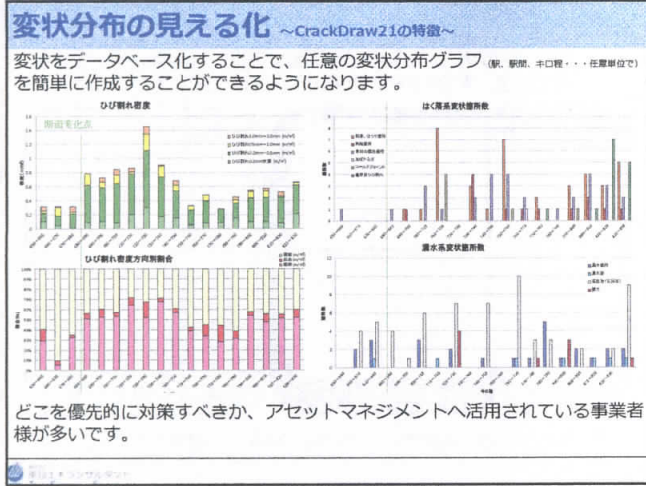
長さ、面積、位置などが数値化されます。
(作成した図形から自動で数値化、手入力でも数値化することも可能)

数値化されたデータベースはcsvファイルで出力できます。



数値化されたデータを活用し、変状の分布状況を「見える化」

個別検査や補修・補強の優先順位付け、抜本的な対策の検討などに活用



画像ベース点検で未点検箇所解決

- 接近・肉眼目視困難箇所の点検可能化

狭所

高所

近接目視が難しい
跨線橋

画像ベース点検で費用削減

- 現場日数を低減(現場規制等の影響を抑制)

交通規制有(点検作業車等)

↓

走行しながら撮影

移動しながらのスケッチ

↓

広範囲でも定点撮影

画像ベース点検の課題の一つ


- 変状検知工数の増大
 - カメラ性能の向上(高解像度・高画素化)により、幅0.2mm以下を含む多くのひび割れが写る

2mm/pixel (2008年撮影)


1mm/pixel (2016年撮影)

画像ベース点検の課題の一つ

- 変状検知工数の増大
 - 画質向上でトレースできるひび割れ本数が増し、その作業工数が増加傾向にある



人によるひび割れトレース: 40本
(2008年撮影)





人によるひび割れトレース: 1571本
(2016年撮影)



凡例 (ひび割れ幅)
0.2mm未満
0.2-0.5mm
0.5-1.0mm

AIによるひび割れ自動検知に向けて

- キヤノン
 - 画像ベース点検で用いられる一眼レフカメラ製造
 - 監視カメラ向けなど、AIの製品適用実績多い


- 東設土木コンサルタント
 - 画像による点検実績15年
 - 土木知識と変状検知に関する豊富なノウハウ

新しい画像ベース点検への試み

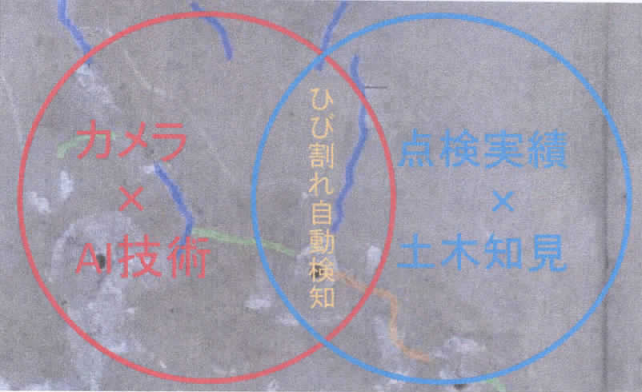
- 画像ベース点検のトレードオフ
 - 品質確保の観点では、高精細画像で点検したい
 - 高精細画像で点検すると、費用削減できない



AI技術によるひび割れ自動検知の活用

- キヤノン(株)との共同研究実施

AIによるひび割れ自動検知に向けて



自動検知事例①ダム(高画質検知)

- 人のトレース結果
- 自動検知結果

人が見落とししたひび割れを含め、
1000本以上のひび割れをおおよそ漏れなく検知できている

自動検知事例②高架橋床版(幅検知)

- 人のトレース結果
- 自動検知結果

色で表現されるひび割れ幅に違いがあるが、ほぼ同様の検知結果

自動検知事例①ダム(画質差の比較)

- 2008年撮影画像
- 2016年撮影画像

画像品質のよい2016年撮影画像のほうが、より多く検知

自動検知事例③コンクリート壁面

10m × 10m の範囲に
500本以上のひび割れ

人が全てを
トレースすると
720分
(かつ、見落とし有)

↓

AI検知結果を
修正するだけなら
90分
<工数 1/8>

AI技術導入による新・画像ベース点検

- メリット
 - 撮影画像の品質が向上していても、妥当な作業工数で変状検知が行える
 - 完璧ではないが、毎回一定の精度でひび割れ等を検知することができる
 - 広大なインフラ構造物を点検する場合でも、少ない人手で画像からの変状検知を行うことができる

東設土木コンサルタント

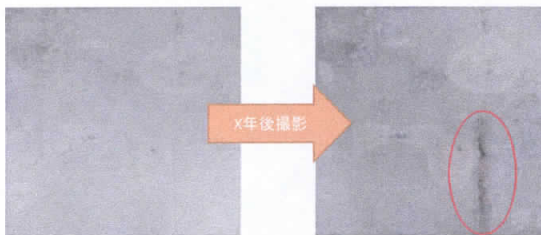
まとめ

- 画像ベース点検とは
 - ①撮影 ②画像処理 ③変状検知
 - 「品質確保」「費用削減」「未点検箇所解決」の手段の一つ
- 課題
 - 撮影画質向上による「品質確保」と変状検知工数増加による「費用増大」のトレードオフ
- AI技術導入による新・画像ベース点検
 - 変状検知作業の削減(ある事例で工数1/8)
 - 広大な構造物も、一定の精度で、効率的に点検
 - 人材不足解消に向けた解決策の一つ

東設土木コンサルタント

今後の展望

- 経年変化の把握支援



- 他変状の自動検知
 - エフロレッセンス、漏水、サビ、剥落箇所等

東設土木コンサルタント

株式会社
東設土木コンサルタント
T OSETSU C IVIL ENGINEERING C ONSULTANT INC.

東設土木コンサルタント

