

11. 維持管理

とりまとめ: 村越潤 (土木研究所)

論文題目: “Structural damage detection and localization using changes in phase angle”

著者: シェリフベスキロウン, 三上修一, 大島俊之
掲載: Vol.52A, pp.659-669, 2006年3月

◆討議 [古田均 (関西大学)]

1. What is the advantage of the proposed method using the change of phase-angle, comparing with the conventional methods using the changes of frequency or mode shape?

2. How to treat the case without the information of intact structures?

◆回答: 1. The advantages of the proposed method using the change of phase-angle, comparing with the conventional methods using the changes of frequency or mode shape can be summarized as follows:

- Modal frequencies are a global property of the structure and generally cannot provide spatial information about structural changes. In other words, changes in frequency may be used to detect the occurrence of damage but it is not clear if shifts in this parameter can be used to identify damage location. Multiple frequency shifts can provide spatial information about structural damage because changes in the structure at different locations will cause different combinations of changes in the modal frequencies. However, as pointed out by several authors, there are often an insufficient number of frequencies with significant enough changes to determine the location of the damage uniquely.
- Several published papers demonstrate that frequency shifts are not sensitive indicators of damage and no clear trend in frequency shifts could be detected with increasing damage level.
- In practice, only a few number of mode shapes can be measured which sometimes decreases the accuracy of damage identification methods that use this parameter. In order to overcome this problem, phase information estimated from the various accelerometer readings at all frequencies in the measurement range and not just the modal frequencies is compared before and after damage using the proposed method. In addition, every measuring channel is used once as a reference for

- other channels, which creates large sets of data. These sets of data are then analyzed using statistical procedures to determine the damage location with more confidence.
 - The accuracy of damage identification methods based on changes in mode shapes depends on the used modes and is sometimes reduced when the damage occurs at a node of the used mode shapes. Using these modes, which have a node at the damage location, sometimes produce false indications of damage at undamaged locations. The proposed method overcomes this drawback by using phase angle data in the total measured frequency range without the need to identify the best modes that should be used. Using phase angle data in the total measured frequency range helps to decrease the influence of the undesired modes of vibration.
 - Using the structure's response at each frequency value in the total measurement range introduces some simplicity to the damage identification process and avoids the complexity of identifying modal data. This feature makes the proposed method easy to be programmed and is, therefore, useful when an automated damage identification process is to be applied for continuous health monitoring of the structure.
 - The proposed method has shown more accurate results when compared to some methods that use mode shapes. However, this comparative study was not included in this paper due to the limited space.
2. The case without the information of intact structures can be treated as follows:
- A baseline finite element model can be constructed utilizing the data from the as-built plans of the structure. Acceleration data and hence phase angle data can be calculated from this model. A comparison of the measured phase angle data with those from the finite element model can be made, and possible damage locations can be estimated using the proposed method. However, creating an accurate finite element model for complex structures is sometimes very difficult.
 - The proposed method presumes that the baseline for comparison is the intact case. However, the extension of damage from a damaged structure to another severe damaged one can also be identified using the same method. In other words, the structure in the current state can be used as the

baseline case for future health monitoring. Then, the increase in damage (that may currently exist) at any location may be identified using the proposed method. Moreover, the initiation of damage at new locations may also be identified. It is, therefore, concluded that the proposed method can be used for detecting and locating both the initiation and extension of damage in a structure.

論文題目：“腐食鋼板の力学特性評価のための板厚計測および有効板厚に関する考察”

著者：杉浦邦征，田村功，渡邊英一，伊藤義人，藤井堅，野上邦栄，永田和寿，岡扶樹
掲載：Vol.52A, pp.679-687, 2006年3月

◆討議 [古田均 (関西大学)]

腐食鋼板の有効板厚を推定する意義をもう少し詳しく説明してください。また、対象構造物とは具体的には何ですか。

◆回答：対象構造物は、研究対象とした試験片が海洋環境で長期暴露された腐食鋼板であるため腐食形態が環境に左右されることを考えると沿岸環境下の鋼構造物となりますが、橋梁、水門など、他の腐食環境下での鋼構造物の残存性能の評価としても、基本的な考え方は同じと考えられます。なお、腐食鋼構造物の残存性能を評価するためには、鋼材自体の材料物性が長期的に変化しないことを考えると、構造物の幾何形状、特に残存断面形状として残存板厚を正確に把握する必要があります。一般に、腐食鋼板の板厚変動は、局所的な応力の流れに乱れを生じさせ、耐荷力、変形能に少なからぬ影響を及ぼします。これらの影響を考慮し、構造物の耐荷力を精度良く評価する必要がありますが、例えば、簡略手法として一様に減厚した断面として残存性能評価を進める上で平均的な板厚（有効板厚）の評価は不可欠です。腐食形状は不確定なものであり、現場での板厚計測が非常に限られた測定点でのみ行われることを踏まえ、計測点数に制約があるときの有効板厚の評価法を本論文では提示しています。

論文題目：“鋼表面の腐食進展に基づく鋼板圧縮強度低下の経時予測”

著者：藤井堅，山本治，原考志，中村秀治
掲載：Vol.52A, pp.689-700, 2006年3月

◆討議 [中山太士 (JR 西日本)]

実橋梁では、腐食しやすい部位や塗装の劣化しやすい部位がありますが、本研究のモデルにより、実構造物に対応した予測も可能ですか。

◆回答：ご指摘のように、実構造物の様々な部位で腐食速度が異なったり、局部的に腐食が進行する現象があります。本モデルは、全面にほぼ同じような腐食が起こると仮定しておりますので、直ぐにこのような局部腐食を扱うことはできません。ただし、少し狭い部位、たとえば桁端のフランジに限定した場合などのように、局部腐食ではあってもその部位を全面腐食と見なすことが可能な場合には、適用可能と考えております。

論文題目：“既設鋼鉄道リベット桁の疲労に関する実験的検討”

著者：杉本一朗，小林裕介，市川篤司
掲載：Vol.52A, pp.701-710, 2006年3月

◆討議 [藤井堅 (広島大学)]

疲労強度に、供用期間中の繰返し載荷回数は影響しないのですか。

◆回答：供用期間中の繰返し載荷回数を考慮することは重要なため、供用期間中の繰返し回数と実験結果の回数を合わせて考慮しました。その結果、供用期間中の繰返し回数はD等級に換算して、通過トン数別に十数万回～200万回程度に相当しましたが、この繰返し回数分をS-N線の実験データに加えても、疲労強度等級が変わるまでには至りませんでした。

論文題目：“腐食鋼部材の腐食形状計測と曲げ耐荷力実験”

著者：山沢哲也，野上邦栄，森猛，塚田祥久
掲載：Vol.52A, pp.711-720, 2006年3月

◆討議 [松田浩 (長崎大学)]

腐食形状計測には、どの程度の時間と精度が必要ですか。

◆回答：単位時間あたりの計測点数は計測間隔に依存しますが、1mm間隔の場合で、200data/minです。今回用いた試験体の場合は、1体あたり5日程度を要しました。計測間隔が短くなると、ステッピングモータの送り時間が短くなるため、単位時間あたりの計測点数は増加します。腐食性状をより正確にとらえるためには、腐食モードよりも小さな測定間隔でなければならないため、今回選択した1mm間隔よりも小さい間隔が要求されます。しかしながら、曲げ耐荷力の評価においては、平均腐食量をもってしても十分に推定可能であることから、腐食計測間隔については、計測時間の制限からおおまかな腐食性状を把握できる程度として1mm間隔を選択しました。

◆討議 [松井繁之 (大阪工業大学)]

腐食鋼材の腐食形状を計測していますが、計測前の腐食生成部除去等の前処理が必要ですが、その処理方法を教えてください。

◆回答：対象とした塗装鋼材については、ハンマーで叩いておおまかな塗装を落としたあとに、母材を痛めないようにサンドブラストを実施しました。腐食の凹部などのようにそれでも塗膜が残っている部分については、金ブラシと研磨剤とを併用して除去しています。試験体が再びさびることを防ぐために、塗膜除去後についてはうすく油膜をひいています。

論文題目：“海洋環境において腐食した円形鋼管の残存圧縮耐力”

著者：藤井堅，近藤恒樹，田村功，渡邊英一，伊藤義人，杉浦邦征，野上邦栄，永田和寿
掲載：Vol.52A, pp.721-730, 2006年3月

◆討議 [松井繁之 (大阪工業大学)]

腐食鋼材の腐食形状を計測していますが、計測前の腐食生成部除去等の前処理が必要ですが、その処理方法を教えてください。

◆回答：今回の実験供試体は、回収後付着物を落とし、サンドブラスト処理を行って錆を除去しました。ブラストの条件については、基準化されたものではありませんが、鋼管の腐食形状が変形しないで錆が除去できる程度の力としております。

◆討議 [松田浩 (長崎大学)]

腐食形状計測には、どの程度の時間と精度が必要ですか。

◆回答：今回の計測は、論文中にもありますが、スピナーーム（計測器の名称）を用いて、同一の座標系で腐食表面の座標値を直接求めております。計測器については、座標値の計測誤差は各座標値で、 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下です。実際の作業では、概ね測定間隔 $0.1\sim 0.3\text{mm}$ で測定しております。これを基に、表面上に作成した 1mm 間隔の格子点の座標値を求め、板厚は、対応する両表面の座標値を差し引くことにより求めております。さらに、耐荷力解析用のシェル要素（1辺 8mm ）板厚は、要素節点の座標はその点の格子点座標の中央面座標としております。計測に費やした時間は、供試体1体（約 4000 万点）につき、4時間です。

腐食表面形状をとらえるために必要な測定間隔は、筆者らの研究では 2mm 以下を得ておりますが、 0.3mm 以下と

指摘されている方もおられます。これについては、腐食形態が関連しますが、まだ十分な知見はないように思われます。また、残存耐力解析面では、従来の解析から、1辺を 10mm 以下くらいにすれば実験結果と概ね一致することがわかっております。

◆討議 [館石和雄 (名古屋大学)]

最小断面平均板厚から $0.6s$ （標準偏差）を引いた値で、実験結果を整理するとよいとのことですが、 $0.6s$ を引くことの意味を教えてください。

◆回答：まず、強度の評価基準としての板厚（代表板厚）は、いままでのいくつかの研究で、代表板厚＝平均板厚－ $\alpha \times$ 標準偏差としていることをふまえ、本研究でも代表板厚をこの式で与えることにしました。この式の α は、荷重形態や腐食表面の形状によって異なると考えられますが、今回の供試体は海洋環境で実際に起こった腐食表面の一例であり、Plantema の式を適用してその残存圧縮強度を評価する場合の α を試算した結果 0.6 となったということがあります。したがって、 $\alpha=0.6$ がいかなる腐食形状にも適用できるとは思っておりませんが、今回の実験では実際の腐食形態に対して得られているという意味で適用性があると考えております。

論文題目：“腐食した鋼線材の曲げ疲労耐久性に関する実験的研究”

著者：大西弘志，松井繁之
掲載：Vol.52A, pp.731-742, 2006年3月

◆討議 [松田浩 (長崎大学)]

1. ケーブルの疲労試験に何故曲げ疲労試験を採用されたのですか。

2. ディビエータ部を想定されているのであれば、フレット疲労等の影響が大きいように思いますが、その点について、考えを聞かせて下さい。

◆回答：1. ケーブル部材における使用形態を考えた場合、その疲労耐久性を考えるためには引張による疲労と曲げによる疲労を考える必要があると考えております。特に腐食したケーブル材の疲労試験においては吊橋のサドル部やPC構造のディビエータ部を想定した曲げ疲労試験のデータが少ないことから、今回の研究では曲げによる疲労試験を実施することにしました。

2. ディビエータ部を想定しているのであればフレット疲労の問題は避けて通れない問題ではありますが、今回、腐食損傷を与えるために使用した環境促進試験機の大きさ

などの試験環境の用件から、フレット疲労を検討するために必要なケーブルモデルによる試験を行わず、単純に腐食損傷のみの影響を受けた場合について調査研究を行うこととしました。

◆討議 [藤井堅 (広島大学)]

疲労試験で繰り返し周波数が 60Hz ですが、周波数の影響はないのですか。

◆回答：ご指摘のとおり、繰り返し周波数が通常の疲労試験でよく見られる 3Hz~10Hz と比較して 60Hz と高いため、载荷速度の影響は多少出ていると思われます。しかしながら、今回の研究では载荷速度をそろえて試験をしておりますので、試験片毎の腐食損傷による影響は相対的に比較しても差し支えないと判断しております。

◆討議 [杉浦邦征 (京都大学)]

質量損失は、 $\phi 7$ と $\phi 5\text{mm}$ で $\phi 5\text{mm}$ の減少が著しいことは寸法効果で理解できるが、疲労強度を応力表示した場合、 $\phi 7$ の強度が総じて低くなっていますが、この原因は何と考えていますか。損傷モード等との関係で説明付けができませんか。

◆回答：本研究におきましては、疲労強度を応力表示する際には、質量損失分を考慮するために、試験片表面に均一に腐食が発生したと想定し、質量減少分に相当する断面積、直径を一様に減じた断面を求めて応力計算に供しております。従いまして、本論文の応力表示には腐食損傷に伴う表面凹凸の影響が全く反映されていないこととなります。これに対して、実際の試験片の表面には凹凸形状が発生しており、この形状の変動幅は質量損失の量と比較して試験片の直径にあまり影響されない傾向を示しているものと見ることができます。このことは、質量減少量による性能低下と比較して表面形状の変化による影響が試験片寸法の影響を受けにくいことを示しているものと考えられ、 $\phi 5$ の試験片と $\phi 7$ の試験片では、試験片の質量減少率が相対的に大きかった $\phi 5$ の試験片のほうが質量減少の影響をより大きく受け、表面形状変化の影響が相対的に小さくなり、 $\phi 7$ の試験片では表面形状変化の影響が相対的に大きくなってしまったために、 $\phi 7$ の試験片の見かけの疲労強度が低下しているように見える結果となってしまったのではないかと考えております。

今回の論文でも述べましたように、腐食した試験片の表面形状変化の影響を考慮すれば、疲労試験結果の統一的な評価は可能であると考えられますので、今回の応力表示にお

ける疲労試験結果の分布形状に関しましても試験片の表面形状の影響を元に議論を進めるのが妥当ではないかと考えております。

◆討議 [館石和雄 (名古屋大学)]

疲労試験での試験体の破壊の様子を教えてください。

◆回答：今回の研究で実施した曲げ疲労試験では、試験片の破壊は腐食区間内での疲労破壊が確認できております。しかしながら、表面形状と破壊位置との関係を明確にできるようなデータを収集することはできていませんので、今後、データの蓄積を行う予定です。

論文題目：“鉄道盛土の新たな耐震評価方法と耐震補強工法の検討”

著者：阪本泰士，関雅樹，永尾拓洋，伊藤義人
掲載：Vol.52A, pp.743-752, 2006年3月

◆討議 [中山太士 (JR 西日本)]

耐震性についての評価について理解できましたが、降雨に対してはどのように考えているのですか。

◆回答：もともとバラストは粒径が大きく、排水性がよいです。その上、耐震バラスト流出防止工には水抜き孔が設けてあるため、降雨に対し問題はないです。

論文題目：“高架橋上の門型標識柱基部の交通振動による疲労耐久性評価”

著者：小塩達也，山田健太郎，片桐英喜，前野裕文
掲載：Vol.52A, pp.765-772, 2006年3月

◆討議 [薄井王尚 (フジエンジニアリング)]

付属構造物の振動は共振以外に、自由振動の影響があると思いますが、自由振動については固有振動数をずらすことによって疲労耐久性を向上させるという手法は通用しないのではないのですか。

◆回答：付属構造物は基部からの加振力により振動を生じます。疲労が生じるような付属構造物が設置された橋梁では、常に大型車両が走行し、橋梁が継続的に振動していますので、付属構造物単体で振動する自由振動が疲労損傷に影響があるとは考えておりません。したがって、基部、すなわち橋面において卓越する振動数範囲に対し付属構造物の固有振動数を離すことが重要と考えています。

論文題目：“目視検査周期の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築”

著者：杉崎光一，貝戸清之，小林潔司

掲載：Vol.52A, pp.781-790, 2006年3月

◆討議 [大西弘志 (大阪大学)]

NY市のデータの中で検査期間中に補修の入ったデータはどれだけあったのですか。また、その影響をどのように評価するべきと考えるのですか(本研究での補修の入ったデータの取扱い)。

◆回答：2時点の検査結果を考慮したとき、後時点でのレーティングが前時点のものよりも状態がよくなっているものを補修の入ったデータと考えており、数としてはサンプル数に対して少数となっています。これらのデータについては取り除いて劣化確率を算出しています。構造物のライフサイクルを考えたときには、これらのデータも含んだ、補修を考慮したモデルの方がより汎用的であるとは考えますが、補修後の構造物の劣化は物理的な意味においても相違すると考えられ、取り除くことで、モデルの解釈のし易さを優先的に選択しています。

◆討議 [奥井義昭 (埼玉大学)]

交通量等の影響を考慮してないようですが、同様な手法で、交通量等の影響を考慮することが可能ですか。

◆回答：本手法においては、サンプルごとの交通量の情報は、考慮せずに集計してしまうため影響を表すことはできません。しかし、他の論文においては、交通量などの影響を考慮できるようにモデルを作成しているものもあり、本手法においても、事前に交通量をカテゴリ分類して、マルコフ推移確率を推定すれば、その影響を考慮することは可能です。

◆討議 [為広尚起 (構造計画研究所)]

「不確実性を考慮」といわれるところの不確実性とは具体的に何に関するものなのかは想定する必要はないのですか。

◆回答：本研究では具体的な不確実性については想定していません。しかし、検査結果データには、すべての劣化に関する不確実性情報が混入していると考えられ、本モデルではそれを確率モデルとして抽象的に表しています。それらを明示的に識別するためには具体的なものを想定しながらモデルを構築することが必要であると考えています。

論文題目：“環境促進実験を用いた鋼橋塗装系の腐食劣化

評価”

著者：金仁泰, 伊藤義人, 肥田達久, 小山明久, 忽那幸浩

掲載：Vol.52A, pp.803-812, 2006年3月

◆討議 [大西弘志 (大阪大学)]

S6-サイクルには紫外線による影響が入っていませんが、それでも光沢や変退色を評価することは妥当なのですか。

◆回答：確かに光沢度および変退色を含む塗装の劣化に及ぼす紫外線の影響は大きいと考えられます。しかしながら、本研究ではS6サイクル腐食促進実験条件下で得られた実験データに基づいて光沢度および変退色の評価を行ったことを了承いただきたいと思います。

論文題目：“ウレア系樹脂を用いたコンクリート剥落防護工の設計法に関する実験的研究”

著者：守屋裕兄, 大西弘志, 松井繁之

掲載：Vol.52A, pp.821-828, 2006年3月

◆討議 [芦塚憲一郎 (西日本高速道路)]

ウレア系樹脂材料は、ガラスクロス繊維と比較して高価になると考えられるが、ウレア系の材料を剥落防護に用いるメリットは何ですか。

◆回答：ウレア系樹脂材料はガラスクロス繊維等を用いた一般的な繊維補強樹脂と比較すると変形性能が特に優れております。この性質を活用することにより、一般的な繊維補強樹脂では剥落防護工の全面剥離につながりかねない量の面外変形が出た場合であっても一部の剥落防護工で支えることができ、全体的な剥離に至らない可能性が高いものと考えられます。また、現在、剥落防護工に適用されているウレア系樹脂材料は弾性係数が比較的低いことから、剥落防護工の裏面でコンクリートの剥離が発生したときには当該部分のみが変形することが期待でき、早期に変状を発見することができるようになります。