

A study on inspection method based on change of vibration characteristics on existing road bridges deteriorated by salt damage

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-07-03 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00051456

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



学 位 論 文 要 旨

塩害劣化した既設道路橋における振動特性
の変化に基づいた点検手法に関する研究

A study on inspection method based on change of vibration
characteristics on existing road bridges deteriorated by salt damage

金沢大学大学院自然科学研究科
環境デザイン学専攻

学 籍 番 号 1524052001

氏 名 有馬 直秀

主任指導教員名 深田 宰史

提 出 年 月 平成30年3月

Abstract

This study on inspection method based on change of vibration characteristics on existing road bridges deteriorated by salt damage caused by airborne salt and antifreeze agents. Regarding concrete bridge, a detailed investigation was carried out on a PCT girder deteriorated by salt damage, and the damage situation was confirmed. In addition, loading tests up to the destruction and structural analysis assuming salt damage deterioration on the PCT girder were carried out to evaluate the load carrying capacity and to clarify the effect of salt damage on the loading capacity. Furthermore, during the loading test, the load was unloaded when the appearance change was confirmed, the vibration test was then conducted under the damage situation at each stage. As the results, the relations between the deflection of the girder owing to the bending test and the changes in natural frequency, in damping constant and in vibration mode were clarified, and the evaluation method using vibration mode was examined. Regarding steel bridge, The vibration of the web panel at the steel girder end of the actual structure was measured, and its vibration characteristics were evaluated. Besides, numerical analysis was performed by changing the reduced thickness of the steel panel and the thinning position, then the evaluation method using the vibration mode and the influence of the vibration characteristics was studied. Moreover, test specimens simulating corrosion damage were produced and tested to examine the feasibility of the proposed approach on-site measurement. From the obtained results, this study introduced an inspection method using web vibration mode.

1. 本研究の目的

本研究では、飛来塩分および凍結防止剤によって塩害の影響を受けた既設道路橋を対象に、振動の変化に基づいた点検手法に関する研究を行った。基本的に構造部材が損傷すると、剛性または質量の変化を生じるとして、固有振動数やモード減衰定数などの振動特性に着目した研究が数多くなされている。その多くは、橋梁全体形を対象としており、数値解析や供試体あるいは撤去する桁を用いて、段階的に損傷を与えて振動特性の影響を検証している。これまでの研究から、局所的な状態変化が生じても構造全体モードの固有振動数や減衰では変状を捉えることが困難であると指摘されている。また、一般的に、固有振動数は、温度依存性の影響があることや減衰定数は、固有振動数の変化に比べてバラツキが多い点などが指摘されている。このため、本研究では、固有振動数および減衰定数に加えて、振動モード形の変化に着目した研究を行った。

コンクリート橋では、塩害により劣化した PCT 桁を対象に、劣化状況を確認するとともに、残存耐荷力の評価および載荷試験による変状形態と振動特性（固有振動数、減衰定数および振動モード）の関係を明らかにし、振動特性の変化に着目した点検手法の有効性を把握することを主な目的とした。鋼橋では、凍結防止剤による塩害で、鋼材腐食によって局部的に減肉した鋼桁端部を対象に、北陸地方における鋼桁端部の腐食傾向を把握し、鋼材の減肉量および減肉位置による振動特性の影響を明らかにし、振動特性の変化に着目した点検手法の有効性を検討した。さらに、構造物の劣化や損傷を効率的かつ効果的に行うための振動特性の変化に着目した点検手法を提案した。

2. 北陸地方の既設道路橋における塩害環境と橋梁の実態把握

北陸地方は積雪寒冷地であり、冬期に北陸道全域にわたり凍結防止剤を散布するため、伸縮装置から凍結防止剤を含む漏水等により、橋梁の桁端部は塩害により劣化が進行している。北陸道における道路橋の延長が約 73km あり、橋梁種別では、鋼橋が約 4 割、コンクリート橋（RC 橋、PC 橋）が約 6 割である。北陸道の建設ピークは、わが国の高度経済成長期である 1970 年代であり、平均供用年数は、30 年を超えており老朽化が進んでいることから効率的な維持管理が求められる。

本章は、北陸地方の高速道路における塩害環境および橋梁の劣化実態について、これまで実施した調査結果や文献等を基に概説し、鋼橋およびコンクリート橋でみられる塩害劣化について飛来塩分および凍結防止剤による塩害環境および劣化実態の影響について関係を明らかにした。また、鋼材腐食による塩害調査として、鋼橋を対象とした付着塩分量調査およびワッペン試験片を用いた鋼材腐食調査を行い、塩害劣化の影響を明らかにした。鋼橋を対象とした付着塩分量調査では、塗替塗装が予定されている 2 橋を対象に、素地調整前後で塩分測定の実験施工を実施した。結果、塗膜が残っている箇所において素地調整後の塩分測定では、概ね $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以下となったが、著しい腐食箇所では鋼材表面に凹凸が見られ、凹部に塩分が残り $50\text{mg}/\text{m}^2$ 以上の高い数値を示した。このことより、水拭き等により付着塩分量を低下させる対策が求められる。ワッペン試験片を用いた鋼材腐食調査では、北陸地方の鋼材腐食の影響を定量的に把握するため、鋼橋を対象に環境条件が異なる箇所にワッペン試験片を設置し、鋼材腐食によるワッペン試験片の質量減少量を測定した。結果、北陸地方の 1 年間の減肉量は、5 橋の平均減肉量で概ね $0.01\sim 0.02\text{mm}/\text{年}$ で、最大平均減肉量は約 $0.05\text{mm}/\text{年}$ となり、鋼材腐食の影響を定量的に確認した。

3. 塩害によって撤去された PCT 桁の劣化状況と力学・振動特性の検討

塩害劣化によって取替えられた PCT 桁を対象（写真 3.1 参照）に、劣化状況と載荷試験による残存耐力の評価、塩害劣化を想定した構造解析による耐力の影響および載荷試験による変状形態と振動特性（固有振動数、減衰定数および振動モード）の関係を明らかにした。

(1) 撤去した PCT 桁の劣化実態調査

PCT 桁の試験体の劣化状況を把握するため、外観調査、圧縮強度・静弾性係数試験、塩化物イオン浸透状況、分極抵抗による PC 鋼材の腐食状況調査、衝撃弾性波によるグラウト充填調査、残存プレストレスの推定、切断面観察によるグラウト充填調査の各種調査を行い、塩害により劣化した PCT 桁の試験体の劣化状況を確認した。

(2) 載荷試験による損傷状況と耐荷性能

載荷試験の結果、PCT 桁の降伏荷重は、道示で算定した終局荷重の計算値 685kN の約 1.1 倍に相当し、外観損傷は著しいが耐力があったと評価できた（図 3.1~図 3.3 参照）。

(3) 塩害劣化を想定した PCT 桁の構造解析による検討

塩害劣化を想定した PCT 桁の構造解析による検討から、PC 鋼材の破断は耐力への影響が大きく、一方、かぶりコンクリートの剥落、鉄筋の付着力低下、鉄筋の有効断面が減少した場合は、PC 鋼材の破断に比べ耐力の影響は小さく、塩害劣化による耐力の影響を明らかにした。

(4) 撤去した PCT 桁における振動試験

撤去した PCT 桁における振動試験では、載荷試験による変状形態と振動特性の関係を把握するため、載荷試験前および載荷試験において外観変状が確認された時点で荷重を除荷し、固有振動数、減衰定数、振動モードを測定し、変状形態と振動特性の関係を確認した。PC 鋼材が降伏するまでは、ひび割れや部分的な剥離が生じていても、固有振動数の変化量が小さいこと、また、固有振動数は実際には温度、風および一般車等の外乱による影響を受けること等を考慮すると、たわみ 1 次振動数の変化を用いた耐荷性能に関する健全度評価は難しいと考えられた。ただし、PC 鋼材が降伏してプレストレスに異変が生じた場合には、固有振動数の変化から耐荷性能に関する健全度評価を行えることを確認した（図 3.4 参照）。減衰定数の変化は、固有振動数と比べ損傷に対して敏感であると考えられたが、供用下での減衰定数を算定する際には測定方法で課題がある（図 3.5 参照）。荷重ケースごとの振動モードの変化に着目した MAC を用いた検討を行った。固有振動数の変化と同様に、PC 鋼材が降伏してプレストレスに異変が生じた場合には、MAC の変化を把握することで、耐荷性の健全度評価が行えることを明らかにした。（図 3.6 参照）。

(5) PC 橋の維持管理方法に関する考察

本検討の結果を整理し、今後の PC 橋における点検・調査に活用できる維持管理方法を提案した。具体的には、PC 橋における点検・調査では、PC グラウトの充填状況および PC 鋼材の腐食状況を定量的に把握することが重要であり、衝撃弾性波法による調査や広域超音波法および X 線透過法を実施する。PC グラウト未充填の可能性があった場合や PC 鋼材が腐食損傷していた場合は、コアによる応力解放等による調査を行い、残存プレストレスを推定し健全性を評価することが重要である。また、PC 鋼材が降伏してプレストレスに異変が生じた場合には、振動特性（固有振動数、減衰定数および MAC）の変化にと基づいた点検手法も有効である。



写真 3.1 撤去した PCT 桁の試験体の劣化状況

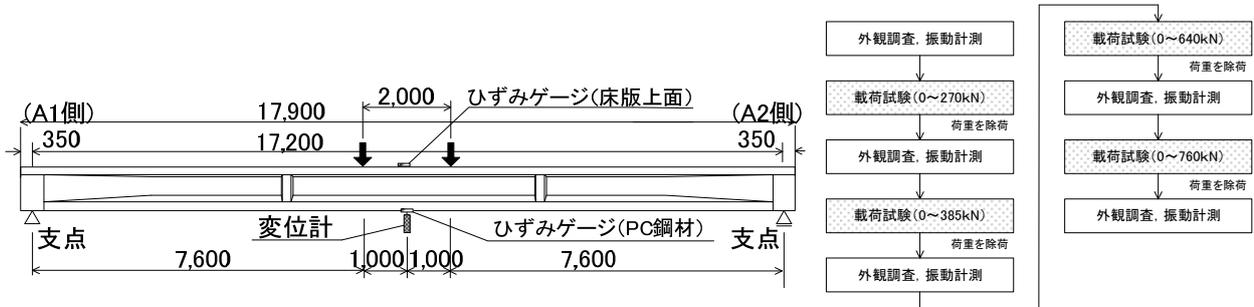


図 3.1 載荷試験の概要

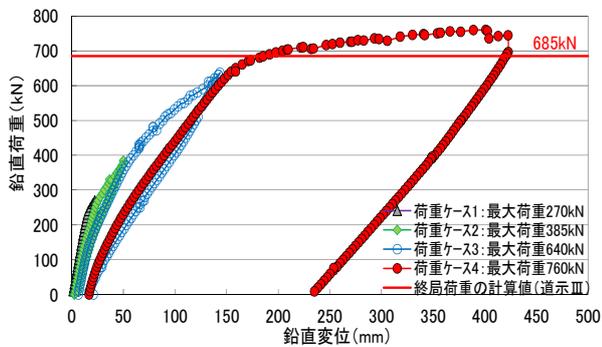


図 3.2 荷重とスパン中央の変位の関係

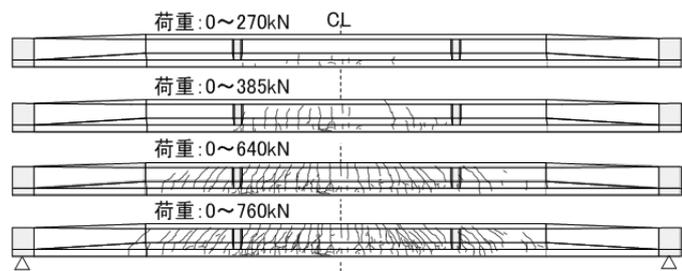


図 3.3 荷重とスパン中央の変位の関係

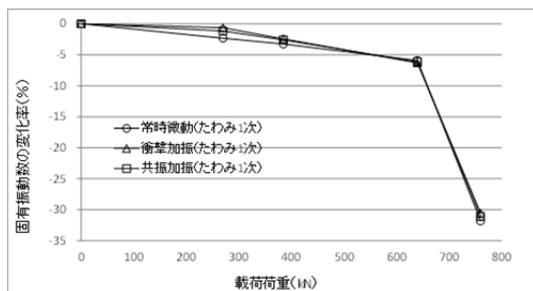


図 3.4 荷重ケースと固有振動数の関係

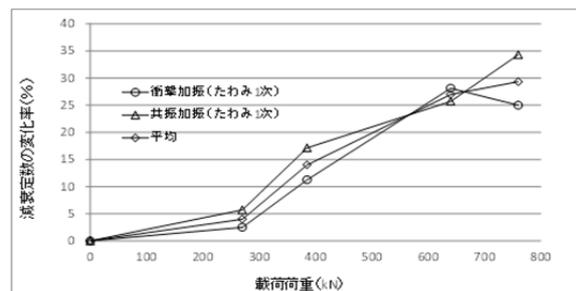


図 3.5 荷重ケースと減衰定数の関係

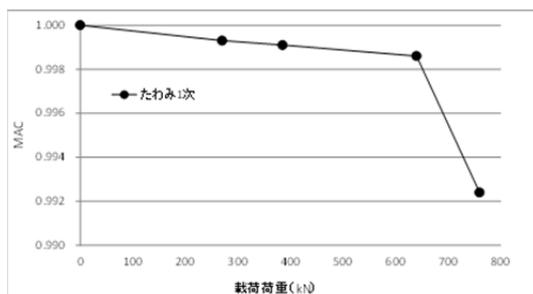


図 3.6 荷重ケースと MAC の低下率の関係

4. 塩害劣化した鋼桁端部の実態把握と振動計測および構造解析による検討

北陸地方の鋼桁端部は、伸縮装置からの漏水等により鋼材腐食により著しい減肉が見られ耐荷力の低下が懸念される。本研究では、北陸地方の鋼桁端部の腐食傾向を把握するため、鋼桁端部が著しく局部腐食した6橋（28桁端部：7支承ライン×4主桁）を対象に調査を行い、簡易な手法で定量的に腐食傾向を評価した。また、ウェブ振動に着目して、現地計測および数値解析により鋼桁端部のウェブパネルの下端が減肉した場合の振動特性を把握し、MACによる健全度評価手法を検討した。

(1) 北陸地方の鋼桁端部の腐食傾向

鋼桁端部が著しく局部腐食した6橋を対象に、目視点検による鋼桁端部の腐食状況から腐食発生パターンの分析した。具体的には、鋼桁端部をウェブ、下フランジおよび垂直補剛材を路肩側、中分側に区分し、さらに垂直補剛材を境界に桁端側と支間側の合計10種類の部位に区分した。また4つの重みづけを行い、腐食傾向を定量的に把握した。分析の結果、外桁（G1桁、G4桁）と内桁（G2桁、G3桁）に着目して腐食度評価を分析すると、外桁は中桁に比べ1.4倍程度となり外桁の方が内桁に比べ腐食しており、外桁の桁端側ウェブが最も腐食する傾向にあった。鋼桁端部の腐食は、垂直補剛材を境に桁端側および支間側で減肉が確認された。腐食高さはウェブ高さに関係なく10cm以下が殆どであり、著しい腐食によりウェブ貫通した箇所は、ウェブ下端の溶接部の直上付近に集中していた。腐食範囲は、桁端側全範囲、支間側は1パネルの範囲に及ぶものもあった（図4.1参照）。

(2) 実構造物におけるウェブ振動計測

実構造物における鋼桁端部のウェブ振動特性を把握するため、比較的健全な桁端ウェブパネルを対象に、車両振動計測およびゴムハンマーによる衝撃加振計測の2パターンで行い、固有振動数の違いおよび振動モード形を確認した（図4.2参照）。振動計測の結果、計測手法により卓越しない振動モード形があったが、同じ振動モード形では、概ね固有振動数は同じであった。2次モード形および3次モード形の振動モード形を検知するには、車両振動計測以外に衝撃加振計測を用いた方が有効であることを確認した。衝撃加振位置は、算出したい振動モード形の腹位置に打撃した方が有効であった。車両振動計測および衝撃加振計測による違いや衝撃加振の位置や強さによっても卓越する固有振動数にばらつきは見られた。このため、複数回振動計測を行い得られた結果を総合的に判断することが重要である。

(3) 鋼桁端部の腐食を想定した振動解析

鋼材腐食による振動特性の影響を定量的に把握するため、実計測した鋼桁端部をモデル化し、健全なモデルと鋼桁端部の腐食損傷を模擬したモデルで固有振動解析を行い、固有振動数および振動モード形を確認した。本検討では、ウェブ支間側とウェブ桁端側の2つの領域を対象にウェブ下端部の板厚を別々に減肉させ、腐食部位と減肉量による振動特性の影響を確認した（図4.3参照）。検討の結果、健全モデルの支間側パネルの振動モード形は、1次モード形が40.0～50.0Hzで、2次モード形が70.0～90.0Hzで、3次モード形が120～140Hzで各々2つ卓越が確認された。一方、桁端側パネルの振動モード形は、1次モード形が70.0～80.0Hzで、2次モード形が110.0～120.0Hzで、3次モード形が150～160Hzで各々2つ卓越が確認された。固有振動数は、板厚が薄くなるにつれ、小さくなる傾向を示し、高次モードの方が固有振動数の低下は大きくなる傾向を示した（図4.4参照）。振動モード形は、板厚が薄くなるにつれ、振動モード形の一部が下端側に移行する傾向にあった。

MAC を用いた評価手法では、鋼桁端部のウェブ下端の板厚の変化により、振動モード形状の影響を検討した。検討の結果、支間側パネルおよび桁端側パネルともに1次モード形より2次モード形、3次モード形と高次モードになるにつれて、桁端側パネルより支間側パネルの方が、ウェブ下端部の板厚減肉による変化量が大きくなった（図 4.5 参照）。

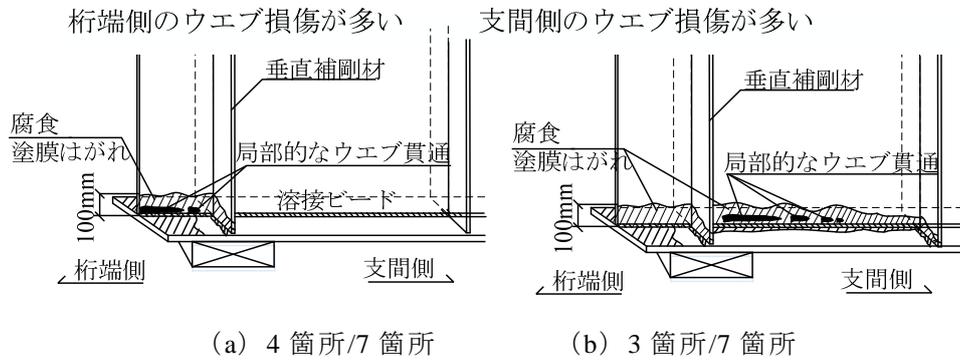


図 4.1 著しい腐食が確認された腐食形態（7 桁端部）

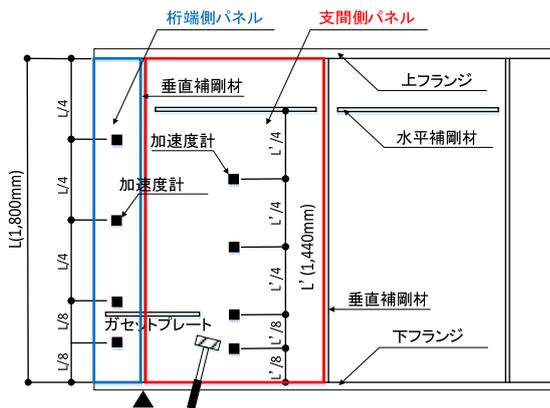


図 4.2 振動計測の概要

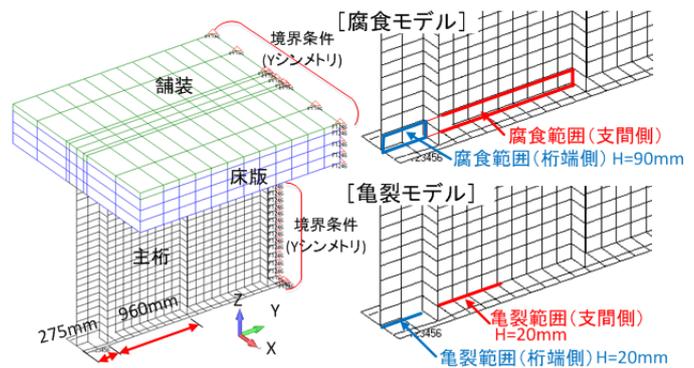


図 4.3 振動解析の概要

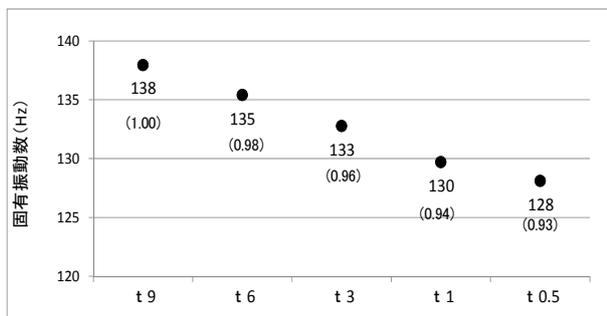


図 4.4 支間側ウェブパネルが腐食損傷による固有振動数の結果(例：3次モード形)

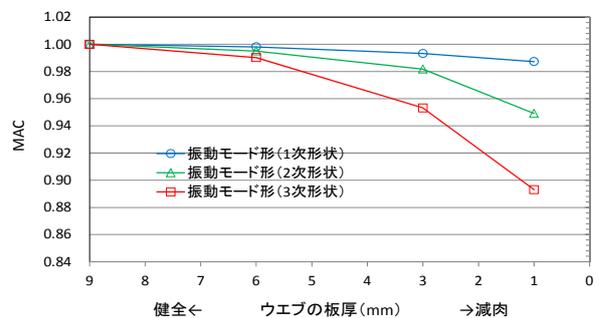


図 4.5 ウェブの板厚変化による MAC の変動(支間側パネル)

5. 鋼桁端部の腐食損傷を模擬した試験体による振動モードを用いた点検手法の検討

前章の検討で、ウェブ振動モードを用いた点検手法の有効性について確認されたが、様々な課題が残された。ウェブ振動モードを用いた点検手法を目指すため、まず、実構造物の鋼桁端部の一部をモデル化し、腐食範囲および減肉量を変化させて固有振動解析を行い、それらが変化した場合の固有振動数と振動モード形の影響を調べた（図 5.1 参照）。次に、腐食部を模擬した試験体を製作して振動計測を行い、検出可能な固有振動数と振動モード形の確認、ウェブ板厚や腐食範囲による影響、および現地計測の際に効率よく点検する計測方法を検討した。さらに、検討結果を踏まえ、鋼桁端部腐食に対してウェブ振動に着目した振動モードを用いた点検手法を提案した。

(1) 鋼桁端部の腐食を想定した振動解析

鋼桁端部の腐食を想定した振動解析の検討から、振動モード形は、ウェブ下端の板厚が薄くなるにつれ、振動モード形の一部が下端側に移行する傾向が示された（図 5.2 参照）。MAC の値は、腐食範囲 L で比較すると 1 次モード形で約 0.99、2 次モード形で約 0.94、3 次モード形で約 0.90 となった。本検討から、ウェブ下端部の腐食範囲がパネルの半分以上であれば、高次モードに着目したウェブ振動計測によって得られた固有振動数および振動モード形の変化を把握すれば、鋼材減肉を検知できる可能性が高いことを確認した。（図 5.3、図 5.4 参照）。

(2) 腐食損傷を模擬した試験体による振動試験

腐食部を模擬した試験体による振動試験（図 5.5 参照）から、衝撃加振に用いるハンマーのピックの材質は、鉄、プラスチックに比べ、ゴムハンマーを用いた方が効果的であることが分かった。全ての試験体において、各振動モード形で解析値と比較するとバラツキは見られるものの明確なモード形を同定することができた。共振加振を行わなくても衝撃加振試験から得られた加速度波形を用いて、ERA 分析により振動モードを同定しても精度のよい結果を得られることが確認できた。3 つの振動モード形において、供試体 2、供試体 3 とウェブ下端部の腐食損傷が大きくなるにつれ、MAC 値は小さくなる傾向が確認できた。振動計測から推定した MAC は、解析値と概ね同じ結果が得られた。このことより、ウェブ桁端部が腐食損傷した場合においては、MAC を用いることで、健全度評価が行える可能性があることを明らかにした（図 5.6 参照）。

本検討から、鋼桁端部腐食に対してウェブ振動に着目した振動モードを用いた点検手法として、以下の内容を提案する。1) 腐食範囲および板厚変化により、1 次振動数に比べ、2 次、3 次振動数の方が低下する割合は大きいため、2 次モード形、3 次モード形の変化に着目する。2) 振動計測の方法は、評価対象とする振動数と振動モード形を得るために衝撃加振による振動計測を行う。衝撃加振に用いるハンマーの材質はゴムハンマー用いて、2 次モード形、3 次モード形が共振しやすいウェブパネル高の中央および下端部を衝撃加振し、ばらつきを考慮し複数回振動計測を行って得られた結果を総合的に判断する。3) 振動計測の分析は、振動計測で得られた加速度波形から FFT 分析および ERA 分析を行い固有振動数および振動モード計を算出する。また、振動計測で得られた固有振動数および振動モード形の妥当性の確認および腐食による影響を把握するため、解析モデルを作成し振動解析を行いその影響を把握しておくことが重要である。4) 鋼桁端部のウェブ下端部の腐食範囲および減肉量の変化による振動モード形の影響を確認するため、MAC の評価手法を用い健全度評価手法のスクリーニングの一つとして役立てることを提案した。

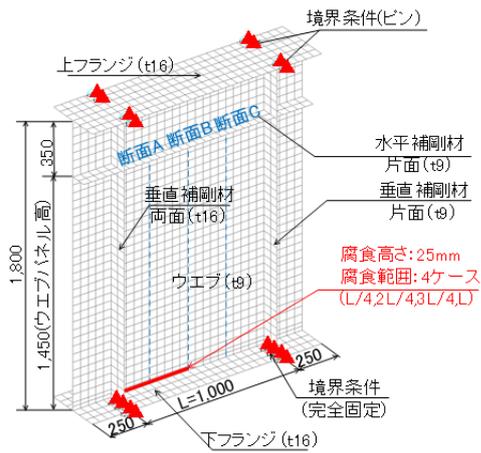


図 5.1 解析モデルの概要

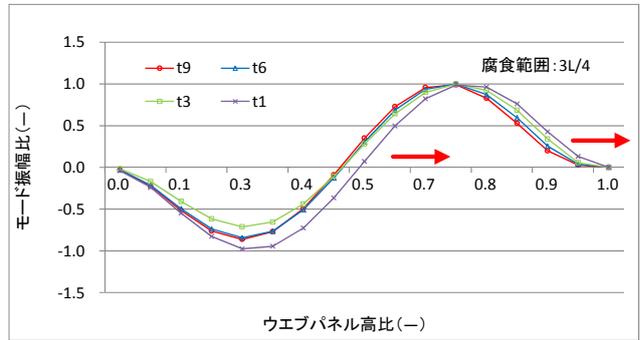


図 5.2 腐食損傷における振動モード形(2次モード形)

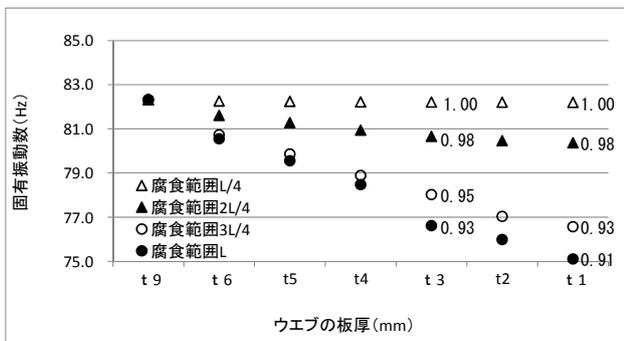


図 5.3 腐食損傷による固有振動数の影響 (例：2次モード形)

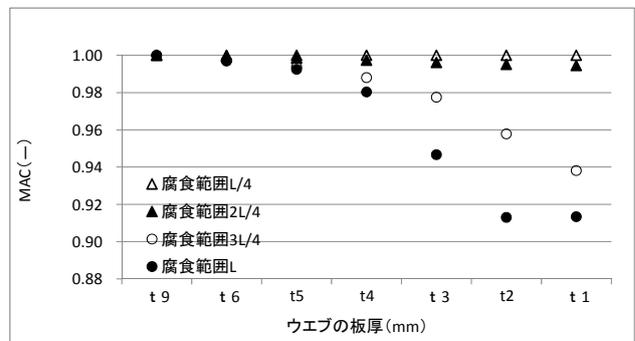


図 5.4 腐食損傷による MAC の影響 (例：2次モード形)

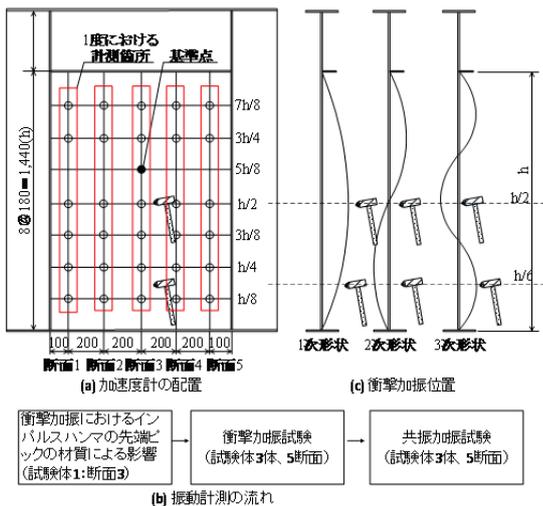


図 5.5 振動計測の概要

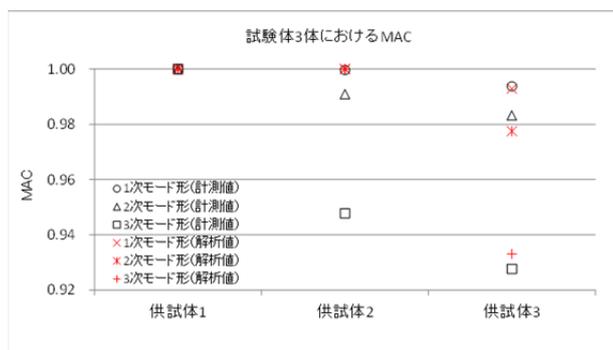


図 5.6 試験体 3 体における MAC (計測値, 解析値)

6. 結論

本研究では、飛来塩分および凍結防止剤によって塩害の影響を受けた既設道路橋を対象に、振動の変化に基づいた点検手法に関する研究を行った。まず、北陸地方における鋼橋およびコンクリート橋でみられる塩害劣化について、飛来塩分および凍結防止剤による塩害環境および劣化実態の影響について関係を明らかにした。また、本研究では、コンクリート橋では、塩害により劣化した PCT 桁を対象に、鋼橋では、凍結防止剤による塩害で鋼材腐食によって局部的に減肉した鋼桁端部を対象に振動特性の変化に基づいた点検手法に関する研究を行った。塩害によって撤去された PCT 桁の検討では、劣化状況を確認するとともに、残存耐荷力の評価および載荷試験による変状形態と振動特性（固有振動数、減衰定数および振動モード）の関係を明らかにした。また、今後の PC 橋における点検・調査に活用できる維持管理方法を提案した。塩害劣化した鋼橋桁端部の振動特性に関する研究では、北陸地方における鋼桁端部の腐食傾向を把握するとともに、実構造物における振動計測、振動解析および試験体を用いて振動計測を行い、鋼材の減肉量および減肉位置による振動特性の影響を明らかにし、振動特性の変化に着目した点検手法の有効性を示した。さらに、構造物の劣化や損傷を効率的かつ効果的に行うための振動特性の変化に着目した点検手法を提案した。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

塩害劣化した既設道路橋における振動特性の変化に基づいた点検手法に関する研究

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏 名 ^{ふり} ^{がな} ^{ありま} ^{なおひで}
有馬 直秀

3. 審査結果の要旨（600～650 字）

本学位申請論文に対して、審査員全員による口頭試問を行うとともに、論文の内容について精査した。また、平成 30 年 1 月 30 日に開催した口頭発表および同日に開催した審査委員会において協議した結果、次のとおり判定した。本学位申請論文は、飛来塩分および凍結防止剤によって塩害の影響を受けた既設の道路橋を対象とした振動特性に基づく点検手法に関する研究を行ったものである。塩害により劣化した PCT 桁を対象にした研究では、PCT 桁の破壊試験の過程において、破壊に伴う各変状段階で振動試験を行い、載荷試験による変状と振動特性（固有振動数、減衰定数および振動モード）の変化との関係を明らかにした。また、凍結防止剤による塩害により腐食した鋼桁端部の局所的な減肉に着目した研究では、鋼材の減肉量および減肉位置を変化させた実物大の鋼桁端部のウェブパネル試験体を作製し、ウェブパネルの振動モードの変化と鋼材減肉量との関係を明らかにし、鋼材の腐食による減肉をウェブパネルの振動モードの変化で評価する点検手法を提案した。このように本学位申請論文は、振動モードの変化を維持管理に活用できることを明らかにし、実務における橋梁点検に大きく貢献するものであり、工学的に有用な知見を多く得ている。また、国際会議において発表を行っており、コミュニケーション能力の確認もできた。以上より、本学位申請者（有馬直秀氏）は博士（工学）に値するものと判定した。

4. 審査結果 (1) 判 定 (いずれかに○印) 合格・不合格

(2) 授与学位 博士(工学)