積雪寒冷地の補強済床版の健全性の診断に向けた点検・調査手法に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：令 3～令 5
担当チーム：寒地構造チーム
研究担当者：畠山乃、仁平陽一郎、
角間恒、蛯子恭好

【要旨】
道路橋コンクリート床版における鋼板接着補強工法は、床版の疲労損傷対策として昭和 50 年頃～平成 10 年頃に数多く採用された工法であり、補強後の経年による損傷の進行が懸念されている。本研究では、下面への鋼板接着補強が行われた床版を対象に、寒冷地における損傷実態を把握するための調査、および、寒冷地特有の損傷状況に着目した調査手法の検討を行った。また、一般的な RC 床版の健全度を簡便に評価する手法の開発に向けた検討として、室内試験により可搬型の衝撃載荷装置（小型 FWD）によるたわみ計測精度の検証を行った。
キーワード：積雪寒冷地、RC 床版、鋼板接着補強、点検・調査、小型 FWD

1. はじめに

昭和 39 年以前の鋼道路橋設計示方書（以下、示方書）に準じて設計された鉄筋コンクリート床版（以下、床版）では、床版厚や鉄筋量の不足によって昭和 47 年以降の示方書により設計された床版と比較して疲労耐久性が劣る。そのため、これらの床版では、疲労損傷の進行や平成 5 年示方書での B 活荷重の導入を受けて、下面への鋼板接着による補強が行われてきた（**写真-1**）。

鋼板が接着された床版（以下、鋼板接着補強床版）では、外観による損傷状況の把握が困難なことが多く、損傷実態を調査した事例は限られる [1]。国土交通省北海道開発局（以下、北海道開発局）が管理する道路橋の場合、昭和 50 年頃～平成 10 年頃にかけて本工法が数多く採用され、補強後の経年による損傷の進行が懸念されるが、寒冷地特有の損傷実態は不明である。また、損傷状況や補強メカニズムに応じた調査、診断手法が十分に整備されていないといった課題もある。

本研究では、寒冷地における鋼板接着補強床版の損傷実態を調査するとともに、調査により把握した寒冷地特有の損傷形態（コンクリートの凍害に起因する補強材アンカー部の損傷）を検知するための調査手法について検討した。また、一般的な RC 床版に対する健全性診断において、可搬型の衝撃載荷装置（小型 FWD）により簡易に取得可能なたわみの活用が有効になると考え、室内試験により、小型 FWD によるたわみ計測精度に関する基礎的な検討を行った。

(a) 全面貼り　　(b) 短冊状

写真-1　鋼板接着補強の例

2. 定期点検結果に基づく鋼板の損傷実態調査

2.1　概要

寒冷地における鋼板接着補強床版の損傷実態を把握するため、北海道開発局が管理する道路橋を対象に、定期点検結果に基づく鋼板の損傷状況を調査した。

2.2　調査方法

北海道開発局が管理する鋼鈑桁橋を上部構造とする RC 床版形式の道路橋から、床版下面への鋼板接着補強が行われた橋梁を抽出し、平成 16～30 年度の定期点検結果を基に損傷状況を調査した。これ以降、平成 16～20 年度の点検結果を 1 回目点検、平成 21～25 年度の点検結果を 2 回目点検、平成 26～30 年度の点検結果を 3 回目点検と呼ぶ。

調査対象橋梁の抽出に当たっては、まず点検調書から床版下面に鋼板の存在が確認できる橋梁を抽出（1 次抽出）し、そこから鋼板の設置時期が明確である橋梁を抽出（2 次抽出）した。その結果、調査対象とした橋梁は 37 橋、要素数は 2070 要素となり、補強材の接着範囲別では、下面全面（ハンチ補強有）が 18 橋 760 要素、下面全面（ハンチ補強無）が 8 橋 492 要素、短

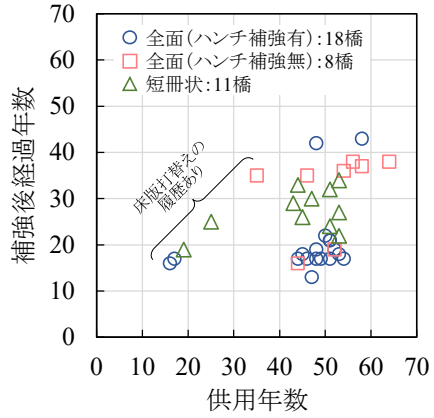


図-1　調査対象橋梁の概要

冊状が 11 橋 818 要素であった。なお、これは鋼板接着補強床版を持つ橋梁および要素の全数ではない。

図-1 は、調査対象橋梁の 3 回目点検時における供用年数と補強後経過年数の分布であり、床版打替えの履歴が確認された橋梁では、床版打替えの実施年を供用開始年と見なして整理した。図より、対象橋梁の 3 回目点検時における供用年数は 16～64 年（平均 47 年）、補強後経過年数は 13～43 年（平均 25 年）の範囲にあった。

調査では、3 回分の点検調書から「補修・補強材の損傷（分類 1：鋼板）」の記録を抽出し、損傷程度の評価区分（**表-1**、**表-2**）を整理した。表のとおり、点検時期によって損傷程度の区分方法が異なるが、整理に当たっては点検調書内の区分を踏襲している。また、区分 e については、腐食・うきのいずれかが発生している場合と両者が発生している場合があることから、点検調書内の写真等を基に損傷種類も整理した。

損傷状況の集計は橋梁単位および要素単位で行い、集計時の損傷状況の分類は**表-3** のとおりとした。一つの集計単位に対して程度の異なる複数の損傷が記録されている場合には、損傷程度が最も大きい区分により当該橋梁・要素の損傷状況を代表させた。

2.3　調査結果

2.3.1　損傷橋梁数および要素数の推移

図-2(a) に、鋼板の損傷状況を橋梁単位で集計した結果を示す。図より、点検回数の増加とともに損傷が記録される橋梁数が増加し、鋼板に何らかの損傷が発生している橋梁（区分 c、e）の割合は、1 回目の約 20%から 3 回目では約 70%となっている。

図-2(b) は、鋼板の損傷状況を要素単位で集計した結果である。橋梁単位の集計と同様、点検回を追うごとに損傷が記録される要素が徐々に増加しているが、3 回目において損傷が発生している要素の割合は約 20%

表-1　損傷程度の区分 [2]**（1 回目点検）**

区分	一般的状況
a	損傷なし
c	補修部の鋼板のうきは発生していないが、シール部が一部剥離し、錆及び漏水が見られる。
e	補修部の鋼板のうきが大きく発生している。シール部分がほとんど剥離し、一部にコンクリートアンカーのうきが見られ、錆及び漏水が著しい。

表-2　損傷程度の区分 [3)、4)]**（2～3 回目点検）**

区分	一般的状況
a	損傷なし
c	補修部の鋼板のうきは発生していないものの、シール部の一部剥離又は錆又は漏水のいずれかの損傷が見られる。
e	次のいずれかの損傷が見られる。 ・補修部の鋼板のうきが発生している。 ・シール部分がほとんど剥離し、一部にコンクリートアンカーのうきが見られ、錆及び漏水が著しい。 ・コンクリートアンカーに腐食が見られる。 ・一部のコンクリートアンカーに、うきが見られる。

表-3　損傷状況の分類

分類	損傷状況	
	腐食	うき
a-a	なし	なし
c-a	あり（区分 c 相当）	なし
e-a	あり（区分 e 相当）	なし
a-e	なし	あり
c-e	あり（区分 c 相当）	あり
e-e	あり（区分 e 相当）	あり
e*	不明	不明

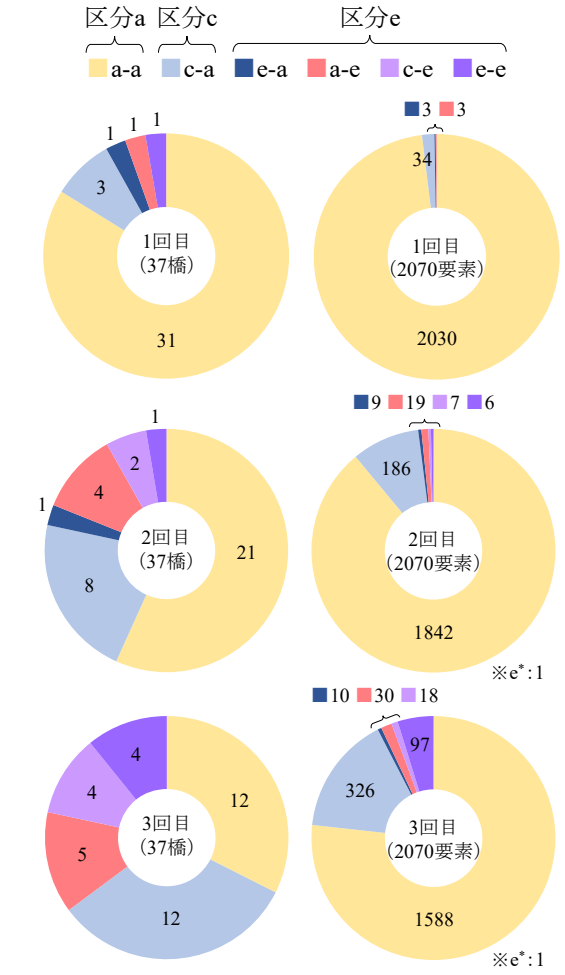
であり、橋梁単位での割合と比較して少ない。**図-2(c)** は、3 回目点検を対象に橋梁毎に損傷分類の割合を集計した結果であり、多くの橋梁で損傷要素の割合は 20%程度以下となり損傷が部分的に留まっているが、中には、No.13 および No.15 のように全ての要素に区分 e の損傷が記録された橋梁も見られた。

2.3.2　損傷種類別の傾向

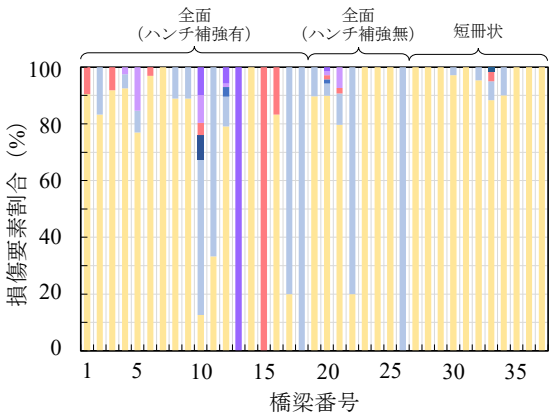
損傷が発生した要素について、損傷種類に着目して損傷状況を整理する。**図-3** は、区分 c 相当の腐食（以下、腐食 c）、区分 e 相当の腐食（以下、腐食 e）、うきが記録された要素数の推移を示したものであり、いずれの損傷種類・区分も徐々に要素数が増加していることがわかる。特に腐食 c の増加が目立つが、健全性への影響（損傷程度の区分）を加味すると、うきの発生・進行が顕著であり、維持管理において留意すべき損傷として注視する必要がある。

2.3.3　損傷が記録されるまでの期間

図-4 に、補強後経過年数ごとに新たに腐食・うきが



(a) 損傷内訳（橋梁）　(b) 損傷内訳（要素）



(c) 損傷要素の割合（3 回目点検）

図-2　損傷状況の集計結果

記録された要素数を示す。整理に当たっては、補強後経過年数と損傷発生の要素数に正の相関関係があると考えたが、両者の間に明確な関係は見られず、本調査の範囲では、損傷が増加する時期として大きく補強後10～20 年程度（腐食 c、腐食 e、うき）、30 年程度以降（腐食 c）、35 年程度以降（うき）の三つがあった。また、補強後経過年数 21 年での腐食 e およびうきの急

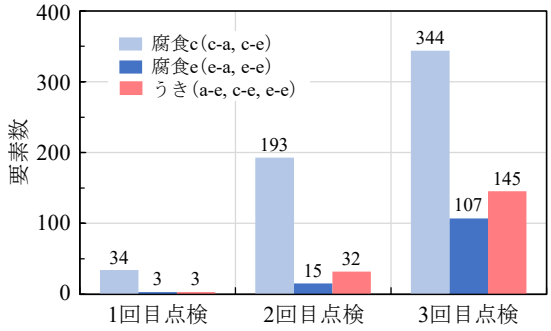


図-3　腐食・うき要素の推移

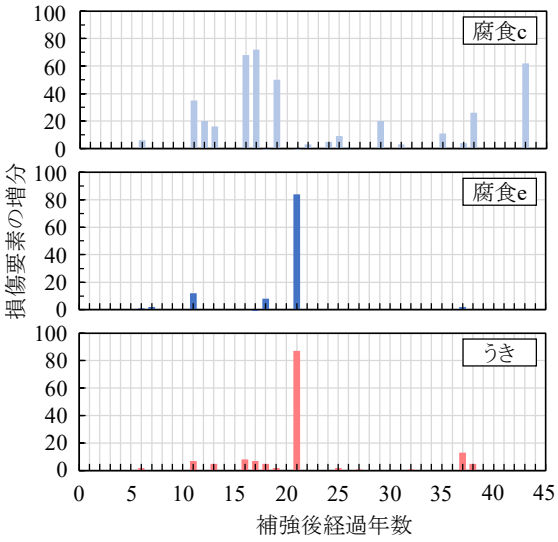


図-4　補強後経過年数ごとの損傷要素増分

増、37 年でのうきの増加は、それぞれ 1 橋（No.13、15）で増加したものであり、いずれも橋梁を構成する全ての要素で区分 e の損傷が記録されていた。鋼板の損傷は、供用環境や施工条件などの違いによりその発生時期や範囲を予測するのは困難であるが、本調査の結果として、経過年数を問わず発生する可能性があること、その範囲が急激に橋梁全体に及ぶ可能性があることを、鋼板接着補強床版の点検・調査時の留意事項に挙げたい。

3. 撤去床版の目視調査に基づく鋼板接着補強床版の損傷形態の分類

3.1　概要

鋼板のうきは、発生範囲や発生位置によっては即座に補強効果の喪失に繋がるものであり、点検・調査においてその状態を的確に把握する必要がある。しかしながら、鋼板のうきに着目した詳細調査事例が極めて少ないこともあり、うきの発生状況は十分に整理されていない。

ここでは、寒冷地における鋼板のうき状況の詳細調

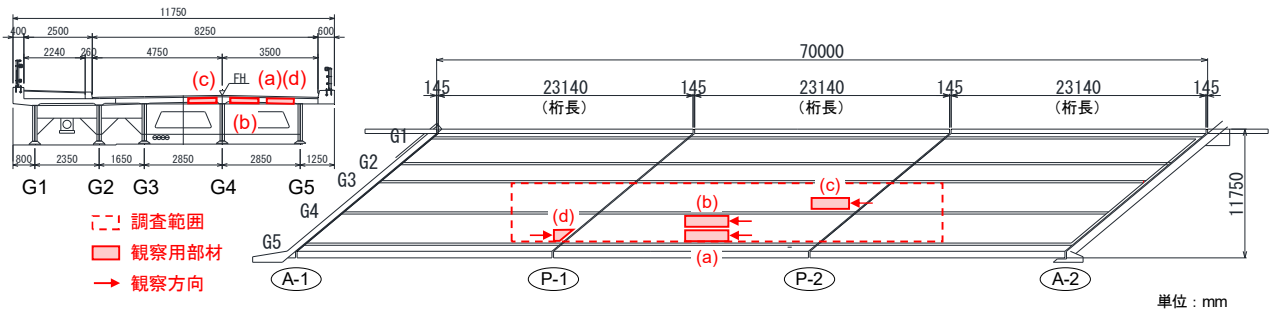


図-5　調査対象橋梁の平面図および断面図

査として、実橋から撤去した床版の切断面観察を行い、うきの発生形態を整理・分類した。なお、本調査では、鋼板内側の床版コンクリートで発生するうきも、広義の意味での鋼板のうきに位置付けている。

3.2　調査方法

3.2.1　対象橋梁

調査対象とした橋梁の平面図および断面図を**図-5**に示す。本橋梁は、昭和 39 年の示方書に準じて設計された 3 径間単純非合成鈑桁橋であり、昭和 40 年の供用開始から 22 年が経過した昭和 62 年に縦桁増設および床版下面への短冊状の鋼板接着が施工されている。また、平成 19 年には床版上面の断面修復および橋面全体への床版防水層の施工が行われている。その後、供用開始から 46 年、鋼板接着補強から 24 年が経過した平成 24 年に床版全面打替えに伴って床版撤去に至った。

本橋梁が位置する路線における大型車交通量は上下線合計で 2,170 台/日（平成 17 年道路交通センサス）、凍害発生の危険性を表す凍害危険度は 3（凍害の予想程度がやや大きい）である。また、撤去床版を対象としたコンクリートの調査では、アルカリシリカ反応による膨張ひび割れが確認されたが、塩化物イオン量は最大でも 0.3kg/m^3 であり、鉄筋腐食は認められなかった。

3.2.2　切断面の観察

図-5 に示す調査範囲から切断・採取した幅 1.0m 程度×長さ 3.0～4.0m 程度の床版ブロックについて、橋軸方向に直交する断面の観察を行った。本床版では、過去に上面の土砂化や内部の層状ひび割れに着目した損傷状況の調査[5)]が行われており、ここでは、床版下面側に着目して損傷状況を再調査した。なお、再調査時点で床版撤去から 10 年が経過しており、その間の屋外保管による損傷進行が想定されたため、切断面の観察は、撤去直後に撮影した切断面写真に基づいて実施している。

3.3　調査結果

撤去床版の切断面観察により確認された損傷形態を**表-4** に分類し、以下にそれぞれの特徴を説明する。

3.3.1　鋼板の剥離

形態 A は、鋼板と床版コンクリートが剥離した状態である。本床版で確認できた範囲において、これらは全て床版コンクリートと接着用樹脂との間で生じたものであったが、他の調査事例[6)]では、鋼板と接着用樹脂との間で生じることも報告されている。

鋼板の剥離が生じる原因として、接着用樹脂の劣化や大型車交通の繰返し走行などの供用環境に起因するもの、接着用樹脂の注入や接着面の不陸処理、施工条件管理（コンクリートの温度や含水率等）の不備などの施工要因に起因するものが考えられる。

3.3.2　かぶりコンクリートの剥離

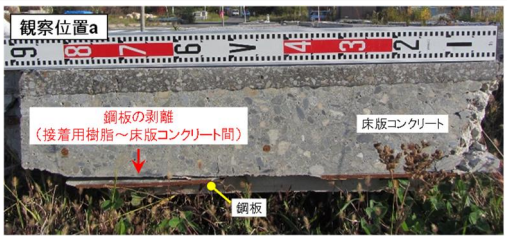
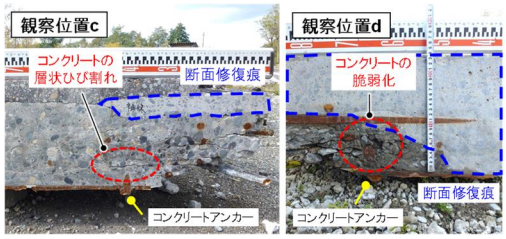
形態 B は、床版コンクリートの下側鉄筋位置付近に水平方向のひび割れが発生し、鋼板内側でかぶりコンクリートが剥離した状態である。かぶりコンクリートの剥離は輪荷重走行に対する耐久性を著しく低下させる[7)]ほか、アンカー部で剥離が発生している場合には、アンカーの引抜強度の低下に繋がる。

都市高速道路における調査事例[8)]によると、鋼板内側における水平ひび割れについては、アンカーの打込みにより発生した先端部のひび割れが、車両走行に伴う床版の変形によって面的に進行した可能性が示唆されている。一方、本橋梁は既往の調査事例とは供用環境が大きく異なるものであり、かぶりコンクリートの剥離が発生する要因については、今後詳細な検討が必要である。

3.3.3　アンカー部コンクリートの損傷

形態 C は、アンカーの打込み部において、床版コンクリートの損傷が進行し、鋼板との一体性の喪失が懸念される状態であり、調査範囲においては、アンカー周辺のコンクリートで骨材が分離するなど著しく脆弱化している様子も確認された。これらは、床版上面か

表-4　うきの発生形態の分類

うき形態	損傷例	特徴
(A) 鋼板の剥離		・注入樹脂による接着部において、接着用樹脂と床版コンクリートが剥離した状態である。 ・補強後の経年劣化の影響のほか、樹脂の注入不足等の施工不良が原因となっていると考えられる。
(B) かぶり剥離		・鋼板内側で床版コンクリートのかぶりが剥離した状態である。 ・剥離範囲がコンクリートアンカー部に及ぶ場合には、アンカーの引抜強度の低下に繋がる。 ・アンカー打込み時に先端で発生したひび割れが、輪荷重の繰返し走行によってかぶりの剥離に進展した可能性が考えられる。
(C) アンカー部 コンクリートの 損傷		・コンクリートアンカー打込み部においてコンクリートの損傷が進行した状態である。 ・上面から浸透した水が下面側に達し、コンクリートの凍害や ASR が進行したものと推察される。 ・左の事例では、上面の断面修復時に損傷部の除去不足があった可能性が推察される。

ら浸入した水が下面側に到達してコンクリートの凍害やアルカリシリカ反応が進行したものと推察され、寒冷地特有の損傷形態であると考えられる。

表中に示す損傷例では、いずれも床版上面の断面修復を行った直下で損傷が発生していた。本床版では、補修履歴として鋼板接着（供用開始 22 年後）と上面の断面修復（同 42 年後）があり、これらの履歴と損傷発生時期の関連性は不明であるが、断面修復時には既に下面側に損傷が発生しており、損傷部の除去が不完全なまま断面修復が行われた可能性を否定できない。アンカー部の健全性の低下は補強効果の低下だけでなく鋼板の落下や床版の抜け落ちに繋がるものであり、寒冷地における鋼板接着補強床版の調査・補修に当たっては、上面の土砂化に加えてアンカー部の損傷状況を確実に把握することが重要である。

4. アンカー部コンクリートの損傷調査手法に関する室内試験

4.1　概要

鋼板内側のコンクリートに発生する損傷に関しては、外観目視によりその発生を確認できず、打音による損傷検出の可否についても不明確な部分が多い。

ここでは、寒冷地特有の損傷形態であるアンカー部コンクリートの凍害等損傷を対象に、打音時に発生する音圧波形の時間周波数特性に基づく損傷検知の可能性について検討した。

4.2　試験方法

4.2.1　試験体

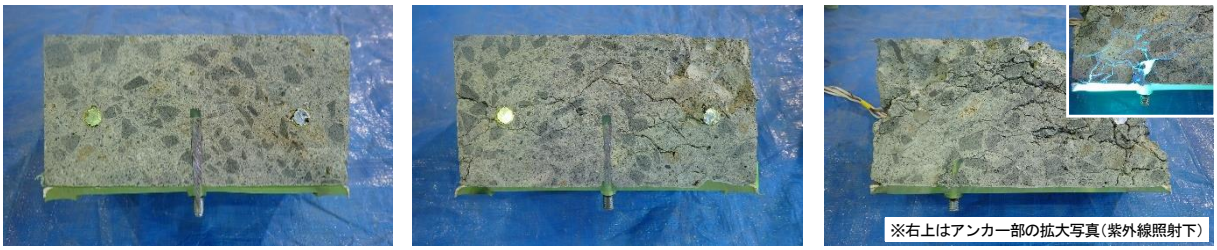
(1)　概要

図-6 は試験体の概要であり、平面寸法 250mm×250mm、厚さ 120mm の鉄筋コンクリート平板に鋼板を接着して試験に供した。コンクリートには JIS A 5308 に準ずるレディミクストコンクリート（早強 24-12-20 N）を、鉄筋には D13（SD345）を、鋼板には厚さ 4.5mm の SS400 材を、打込み式金属系アンカーには M10（SS400）を、接着用樹脂には二液性エポキシ樹脂（混合粘度 2000±1000mPa・s、20℃）を使用した。

試験体は合計 5 体製作し、2 体（S-1、S-2）ではアンカー部コンクリートが健全な状態を、3 体（D_{I}-1、D_{I}-2、D_{II}-1）ではアンカー部コンクリートに損傷が生じた状態を想定した。D_{I}-1、D_{I}-2、D_{II}-1 におけるコンクリートの損傷は、フレッシュ状態のコンクリートに酸化カルシウムを主成分とする静的破砕剤を添加することで模擬的に導入したもの [9]であり、静的破砕剤の添加量を調整することで、コンクリートに導入する損傷の程度も変化させた（D_{I}-1 と D_{I}-2 は同一の状態、D_{II}-1 は損傷が大きい状態を想定）。なお、実構造物でアンカー部のコンクリートに損傷が生じている場合には、同時に

(a) アンカーの打込み　(b) 接着用樹脂の流し込み　(c) アンカーキャップの設置

写真-2　補強材の接着手順



(a) 健全（S-1、S-2）　(b) 損傷あり（D_I-1、D_I-2）　(c) 損傷あり（D_{II}-1）

写真-3　アンカー部の損傷状況

鋼板やアンカーとコンクリートとの間に剥離が生じていることも想定されるが、本試験体ではこれらを考慮していない。

(2) 鋼板の接着手順

鋼板の接着は、作業性を考慮して鉛直下向きに行った。**写真-2** に接着手順を示す。まず、鉄筋コンクリート平板に径 10.6mm および長さ 60mm のアンカー孔を削孔、深さ 40mm までアンカーを差し込み打込んだ後、コンクリート表面から 5.0mm の高さに鋼板を設置して固定した。その後、鋼板周囲のコンクリート露出部から接着用樹脂を流し込み、試験体に打撃による振動を与えることで、鋼板、アンカー、コンクリートの間の隙間に樹脂を充填させた。実構造物を対象にした鋼板接着補強工では、一般的に鋼板に設置した小径孔から接着用樹脂を圧入するが、1 体当たりの接着面積が小さい本試験体においては、樹脂の充填不良が生じる可能性が低いと考えられたため上記の方法を採用した。最後に、アンカー末端部（露出部）に、二液性のエポキシ樹脂系パテ材を充填した鋼製のアンカーキャップを設置した。

上記の接着作業は、コンクリートに損傷が導入された後に実施しており、損傷進行と鋼板接着の時系列が実構造物に合致していない可能性がある。

(3) 試験体の損傷状況

上記の方法により打音試験対象とは別に試験体を製作して、内部（切断面）の損傷状況を目視観察した。

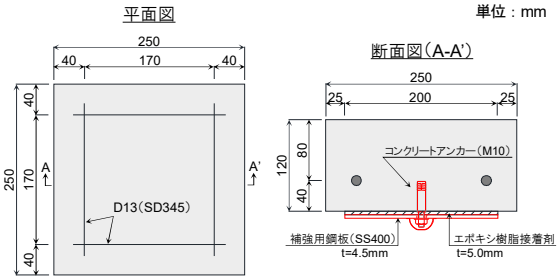


図-6　試験体概要

これらの試験体では、接着用樹脂に紫外線照射下で発光する蛍光染料を添加することで、接着時の樹脂充填に伴うひび割れの閉塞状況を観察しやすいようにしている。

写真-3 に、アンカー部のコンクリートの状態を目視観察した結果を示す。写真より、健全状態を想定した試験体（**写真-3(a)**）の内部にひび割れの発生は確認されなかったのに対し、アンカー部の損傷を想定した試験体（**写真-3(b)**および**(c)**）では、コンクリートに複数本のひび割れが発生しているのを確認できる。また、D_I-1 および D_I-2 と D_{II}-1 では明らかに損傷状況が異なり、D_{II}-1 においてアンカー周囲のひび割れが多く、かつ、多数の微細なひび割れが見られる部位の周囲でコンクリートに顕著なひび割れが発生した状態となっている。なお、D_{II}-1 では、紫外線照射時にアンカー部のコンクリートが発光する様子が確認されており、打音用試験体においても接着用樹脂によってコンクリート

に発生したひび割れが部分的に閉塞されていた可能性がある。

4.2.2 打音の収録方法

打音試験は、寒地土木研究所の実験室内において実施した。**表-5** に打撃条件を示しており、試験体 1 体につき、打撃箇所や打撃用ハンマーの種類の組合せを変えた 4 ケース、合計 12 回分の打音データを収録した。打撃箇所や打撃用ハンマーの種類を変化させたのは、アンカー部コンクリートの損傷を捉えやすい打撃条件を把握するためであり、前者ではアンカーキャップの有無、後者ではハンマーの質量（橋梁点検用ハンマー：220g、建築土木用鋼製ハンマー：780g）を試験パラメータにした。

打音の収録には音声編集用フリーソフト Audacity（ver. 3.3.3）を使用し、アンカーから 150mm 程度の位置に配置した単一指向性のステレオコンデンサーマイク（サンプルレート 44.1kHz、ビットレート 16bit、周波数特性 20Hz～20kHz）により収音して、wav ファイルとしてノートパソコンに取り込んだ。

4.2.3 打音の解析方法

打音試験結果の分析に当たり、収録した音圧時刻歴波形（以下、応答波形）の時間周波数解析を行った。その際、波形データの前処理として、(1)ステレオ音声のモノラル音声への変換、(2)波形データの抽出、(3)音圧振幅の正規化を行っている。

時間周波数解析は Morlet 関数をマザーウェーブレットとする連続ウェーブレット変換により行い、試験体毎に得られたスカログラム（信号強度を時間と周波数の関数として図化したもの）に基づき応答波形の時間周波数特性（以下、周波数特性）を比較した。なお、本研究における連続ウェーブレット変換は、python（ver. 3.11.4）のライブラリ swan を用いて実施した。

4.3 調査結果

図-7 および**図-8** に、応答波形データに連続ウェーブレット変換を適用して得たスカログラムを示す。ここでは、各ケース 3 回の打音を行ったうちの代表的な結果を例示しており、これらの周波数特性を比較する。

4.3.1 アンカーキャップ上を打撃した場合

図-7(a) は、橋梁点検用ハンマーによりアンカーキャップ上を打撃した場合の周波数特性であり、健全状態を想定した S-1 および S-2 では、いずれも周波数 8～10kHz 程度、時間 0.005sec 以前に信号強度のピークが現れた。また、損傷の発生を想定した 3 体では、試験体によって周波数特性に差異があった。このうち、D_I-1 では応答波形の継続時間がやや長くなる傾向があることを除くと、S-1 および S-2 と比較して周波数特性の差異は認められなかった。一方、D_I-2 では、ピーク周波数は前述の 3 体と同程度であるが、6kHz 程度の波形が比較的長い時間継続し、また、低周波数域でも応答が見られた。さらに、D_{II}-1 では、周波数 3～4kHz 程度で信号強度がやや大きくなるなど応答波形の周波数帯が広範囲に分布し、信号強度のピークは不明瞭になった。

表-5 打撃条件

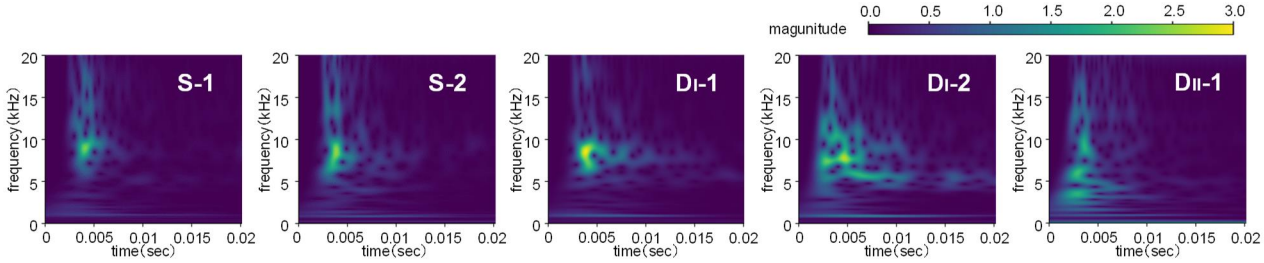
項目	条件
打撃方向	鉛直下向き
打撃箇所	1) アンカーキャップ 2) アンカーキャップ撤去後のアンカー末端
打撃用ハンマー	1) 質量 220g の橋梁点検用ハンマー 2) 質量 780g の建築土木用鋼製ハンマー
打撃回数	1 ケース当たり 3 回

図-7(b) に、建築土木用ハンマーによりアンカーキャップ上を打撃した場合の周波数特性を示す。本ケースでは、いずれも周波数 1kHz 程度の信号強度が大きくなった。アンカー部の状態の違いに着目すると、損傷有無によって信号強度が大きくなる周波数に差異があり、周波数 1kHz 程度の波形が卓越する S-1 および S-2 に対し、D_I-1、D_I-2、D_{II}-1 では、それよりも大きな周波数（4～7kHz）で信号強度の増大が見られた。また、D_I-2 では、明らかに信号強度が高い周波数帯の継続時間が長くなっていることもわかる。

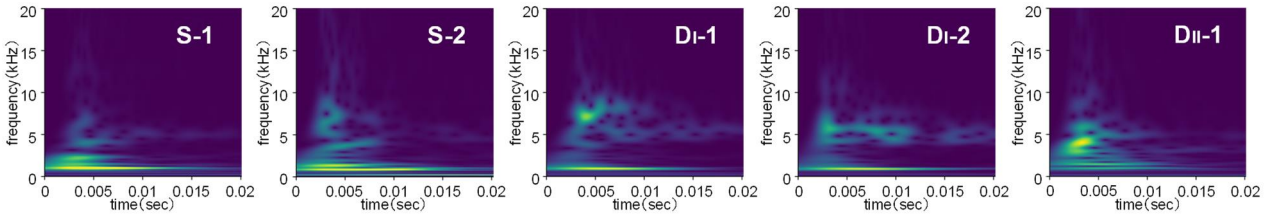
4.3.2 アンカー末端を打撃した場合

図-8(a) に、アンカーキャップを撤去した状態で、橋梁点検用ハンマーによりアンカー末端を打撃した場合の周波数特性を示す。本ケースは、本試験の範囲内で、アンカー部の状態に応じた周波数特性の差異が最も不明確であった。具体的には、いずれの試験体も信号強度の明確なピークが現れず、応答波形の周波数が 5～15kHz 程度の広範囲に分布した。また、D_I-2 を除くと、損傷有無による応答波形の継続時間への影響も明確ではない。

図-8(b) に、アンカーキャップを撤去した状態で、建築土木用ハンマーによりアンカー末端を打撃した場合の周波数特性を示す。本ケースにおける周波数特性は、**図-7(b)** に示したアンカーキャップ上を打撃した場合に類似しており、1kHz 程度以下の信号強度が大きくなっている。また、損傷ありの場合には、1kHz より高い周波数の信号強度が大きく、継続時間もやや長くなっている様子がわかる。

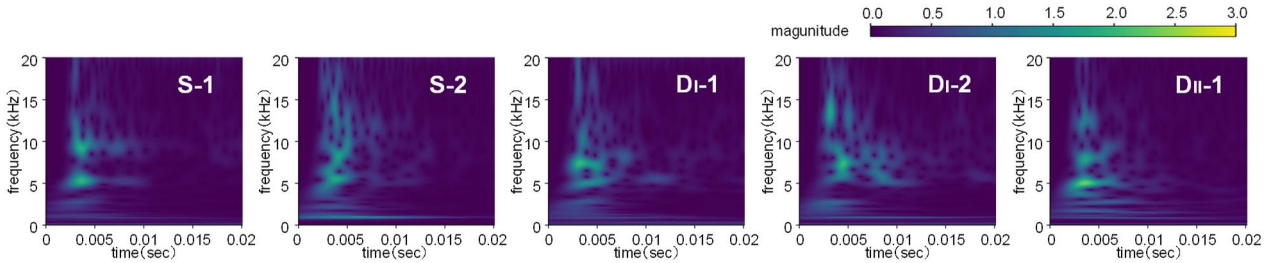


(a) 橋梁点検用ハンマー（質量 220g）

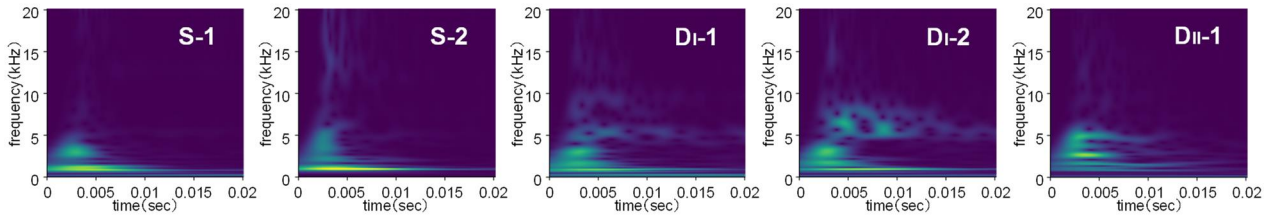


(b) 建築土木用ハンマー（質量 780g）

図-7　打音波形の時間周波数解析結果（アンカーキャップを打撃した場合）



(a) 橋梁点検用ハンマー（質量 220g）



(b) 建築土木用ハンマー（質量 780g）

図-8　打音波形の時間周波数解析結果（アンカー末端を打撃した場合）

4.4　試験結果のまとめ

スカログラムに基づき応答波形の時間周波数特性を簡易に比較した結果を総合すると、応答波形の時間周波数特性（ピーク周波数や応答波形の継続時間）の違いによってアンカー部コンクリートの状態の違いを捉えられる可能性があると考えられる。また、橋梁点検ハンマーより質量が大きいハンマーを使用した場合に、損傷有無による応答波形の時間周波数特性の変化を捉えやすくなることが推察される。

さらに、アンカー部コンクリートの損傷程度の影響に言及すると、本試験の範囲では、相対的に軽度な損傷（D_I-1 および D_I-2）は応答波形の継続時間の変化を、相対的に重度な損傷（D_{II}-1）は打音波形のピーク周波数の変化をもたらした。この結果からは、打音波形の時間周波数特性に着目することで損傷状態を評価できる可能性があることが示唆される。

以上は、限られた試験体条件の下で得られた知見であり、本手法の妥当性を詳細に検証するためには、実構造物で想定される多様な損傷状態（例えば、鋼板やアンカーと床版との剥離）や試験環境が調査結果に与える影響について検討していく必要がある。

5. 小型 FWD による簡易たわみ計測手法に関する室内試験

5.1　概要

一般的な RC 床版の健全度を評価する方法の一つにたわみを活用する方法[10]があり、鋼板接着補強床版のように外観からの損傷状況の把握が困難な場合には、

簡便かつ直接的に床版の状態を把握する手法になり得る。

実橋におけるたわみ計測では、これまで荷重車を用いて載荷試験を行う方法が一般的であったが、より簡便な方法として、車載型や自走型、可搬型の衝撃載荷装置を活用する方法が検討されている[11]。ただし、実橋での適用に向けては、たわみ計測精度が十分に検証されていないなどの課題がある。

本研究では、衝撃載荷装置として可搬型の小型 FWD に着目し、室内試験結果を基に簡易たわみ計測手法としての適用性を検討した。

5.2 試験方法

5.2.1 試験体

試験には、**図-9** 中に示す幅 360mm、高さ 200mm、長さ 2700mm の鉄筋コンクリートはり試験体を使用した。試験体内には、軸方向引張鉄筋として D16（SD345）が 3 本配置されている。コンクリートには JIS A 5308 に準ずるレディミクストコンクリート（早強 21-8-20 N）を使用しており、はり試験体と同時に製作したコンクリートテストピースにより計測した材齢 85 日での圧縮強度および静弾性係数は、それぞれ 33.3N/mm^2 および 26.1kN/mm^2 であった。

5.2.2 載荷および計測方法

図-9 に試験フローを示す。試験は「静的載荷（4 点曲げ）による損傷導入」、「打撃による固有振動数計測」、「静的載荷（3 点曲げ）によるたわみ計測」、「小型 FWD によるたわみ計測」の 4 工程を 1 サイクル（cyc）とし、同一試験体に対し導入する損傷程度を変えて合計 9cyc を実施した。

試験体への損傷の導入は支点間隔 2200mm、等曲げスパン 400mm とする 4 点曲げ載荷により実施し、油圧ジャッキを用いて所定の状態に達するまで荷重を静的に漸増させた後、除荷した。**表-6** に各サイクルで導入した損傷を一覧にして示す。

固有振動数は、試験体に対して鉛直方向にハンマー打撃を行った際の応答加速度波形をフーリエ変換することで計測した。ハンマー打撃の位置は試験体中央付近とし、試験体中央上面に設置したひずみゲージ式加速度計（容量 2G）により鉛直加速度を取得した。

3 点曲げ載荷による静的たわみの計測は、小型 FWD によるたわみ計測精度の検証用に実施するものであり、油圧ジャッキを用いて試験体中央に荷重 15kN を載荷および除荷を行う過程で、試験体中央下面のたわみを取得した。なお、1cyc 当たり載荷～除荷を 3 回繰返している。

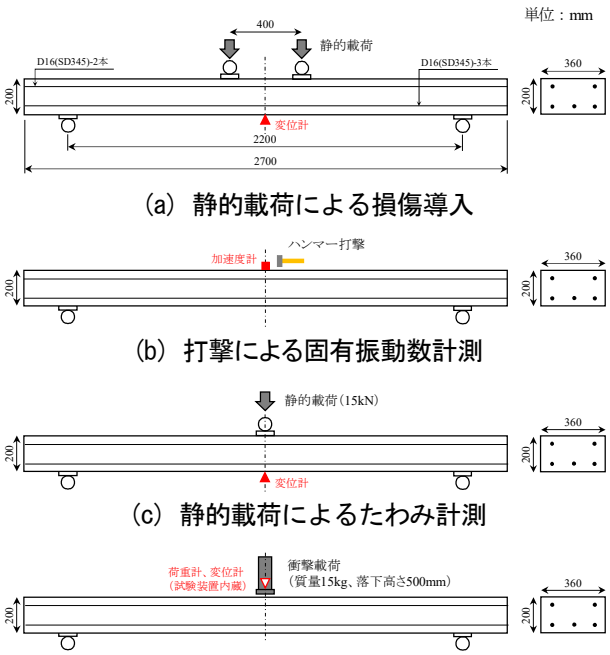


図-9 試験フロー

表-6 導入した損傷の一覧

cyc	損傷制御点		損傷状態
1	荷重※1	15kN	～曲げひび割れ発生
2		20kN	
3		30kN	～部材降伏
4		40kN	
5		50kN	
6		70kN	
7	たわみ※2	13mm	～終局状態
8		18mm	
9	荷重※1	低下	

※1：2 点載荷の合計値
※2：当該サイクル内での増分

小型 FWD によるたわみ計測には東京測器研究所の FWD-Light（KFDT-100A）を使用し、試験体中央上面に質量 15kg の重錘を高さ 500mm から落下させて衝撃荷重波形および応答たわみ波形を取得した（**写真-4**）。荷重およびたわみの取得は試験装置の載荷部に内蔵されたセンサにより行い、1cyc 当たり 4 回の重錘落下を行ったうち 2～4 回目のデータを精度検証に用いた。

5.3 試験結果

5.3.1 試験体の損傷過程

図-10 に、4 点曲げ載荷による損傷導入過程で計測した荷重と試験体中央たわみの関係を示す。実際の試験では、載荷装置の入れ替えのために試験工程毎に計測値をゼロリセットしたが、本図では前サイクルの除荷時たわみを考慮することで連続データとして示した。また、図中には損傷状態の制御点も併せて示す。

本試験体は、鉄筋降伏後に上縁コンクリートが圧壊して荷重低下に至る典型的な曲げ引張破壊を呈しており、1～2cyc は曲げひび割れ発生までの過程、3～6cyc は曲げひび割れが進展して部材降伏に至る過程、7～8cyc は部材降伏後にたわみが大きく増加していく過程、9cyc は終局状態（曲げ引張破壊）に対応する。

5.3.2　たわみ計測精度の検証

小型 FWD によるたわみ計測精度の検証は、次式で定義する部材剛性により行った。

$$K_S = P_S / w_S \quad (1)$$

$$K_F = P_F / w_F \quad (2)$$

ここで、K_S：静的載荷による部材剛性（kN/mm）、P_S：静的荷重（＝15kN）、w_S：P_S 載荷時の試験体中央下面のたわみ（mm）、K_F：衝撃載荷による部材剛性（kN/mm）、P_F：衝撃荷重波形のピーク値（kN）、w_F：応答たわみ波形のピーク値（mm）である。

図-11 に、1～9cyc の各損傷段階において K_F と K_S を比較した結果を示す。図より、小型 FWD による簡易手法では、損傷の進行に伴い部材剛性が低下していく様子を捉えられている。一方で、試験を通して静的載荷時よりも部材剛性を小さく（たわみを大きく）評価し、また、損傷の進行程度によって K_F と K_S の比（K_F/K_S）が変化する傾向が見られている。これは、静的たわみをベースにした床版の健全度評価手法に小型 FWD による計測値を直接的に使用した場合に、健全度が極端に安全側に評価される可能性があり、適切に健全度を評価するためには計測値を静的たわみに換算する手法を見出す必要があることを示すものである。

5.3.3　たわみ換算方法の検討

(1)　固有振動数

小型 FWD によるたわみを静的たわみに換算する方法を検討するため、K_F/K_S と固有振動数（曲げ 1 次モード）の関係を整理した結果を**図-12** に示す。本試験では損傷の進行につれて固有振動数が 60Hz 程度から 30Hz 程度に低下し、この範囲において、K_F/K_s と固有振動数の間に線形の相関関係が見られた。このことから、固有振動数を活用することで小型 FWD によるたわみを静的たわみに換算でき、衝撃載荷時にたわみと同時に固有振動数（加速度）を計測しておくことが有効になると示唆される。

なお、既往事例に床版試験体や実橋床版の固有振動数（1 次モード）が 40～50Hz 付近にあることを報告するものがある [12]。部材形状や支点条件等の影響については今後の検討が必要だが、固有周波数の観点では、ここでの検討が床版部材の振動特性を含む範囲で行われたものであったことを付記する。

写真-4　小型 FWD によるたわみ計測状況

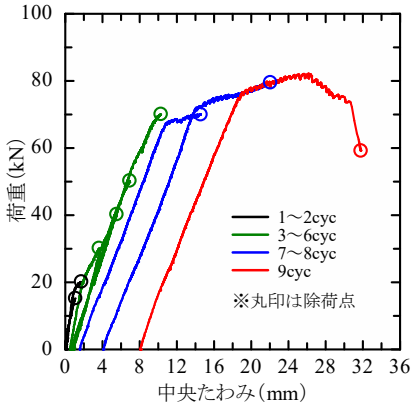


図-10　荷重と中央たわみの関係（損傷導入過程）

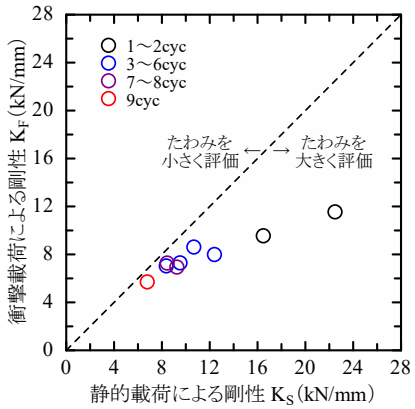


図-11　剛性の比較

(2)　衝撃荷重の作用時間

上述のように固有振動数を使用してたわみを換算できる可能性があるが、実橋でのデータ取得および分析の難易度を考えたとき、より簡便な方法で換算できるほうが望ましい。そこで、衝撃荷重の作用時間（以下、荷重作用時間）に着目して K_F/K_s を整理した結果を**図-13** に示す。図より、固有振動数と同様に K_F/K_S と荷重作用時間の間に線形の相関関係が成り立っており、荷重作用時間を用いることでたわみ換算をより簡単に行える可能性がある。

さらに、本研究では試験体コンクリート上に重錘を

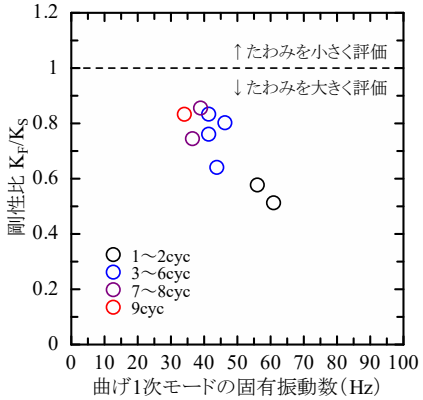


図-12　剛性比と固有振動数の関係

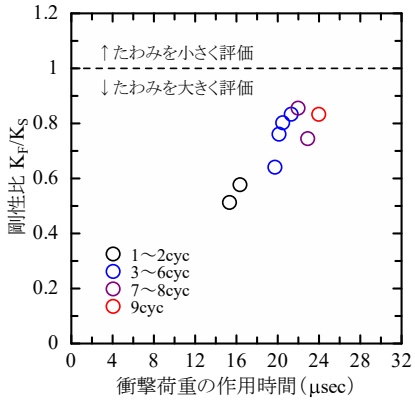


図-13　剛性比と衝撃荷重の作用時間の関係

直接落下させたが、実橋においては、アスファルト舗装上や上面に損傷が発生した床版上に重錘を落下させることも考えられる。この場合、アスファルトの粘弾性や損傷部での局所的な振動等が荷重作用時間に影響する可能性があることから、重錘落下面の状態も考慮した換算方法の検討が必要になると考えられる。

5.4　試験結果のまとめ

以上の結果、小型 FWD を使用した簡易たわみ計測手法により、曲げ損傷の進行に伴う RC 部材の剛性低下を捉えられることを確認した。また、小型 FWD では静的載荷時と比較して部材剛性を小さく評価すること、固有振動数や衝撃荷重の作用時間を用いた計測結果の換算が可能であることを明らかにした。

今後の課題として、実規模の床版部材に対するたわみ計測精度の検証やたわみの換算方法の検討が挙げられる。

6. まとめ

本研究では、下面への鋼板接着補強が行われた RC 床版を対象に、寒冷地における損傷実態を把握するための調査、および、寒冷地特有の損傷状況に着目した調査手法の検討を行った。また、一般的な RC 床版の健全度を簡便に評価する手法の開発に向けた検討として、室内試験により可搬型の衝撃載荷装置(小型 FWD)によるたわみ計測精度の検証を行った。

1) 寒冷地における鋼板接着補強床版では、橋梁定期点検の回数を重ねるごとに鋼板の損傷が記録される橋梁数が増加している。また、損傷種類としてはうきの発生・進行が顕著であり、維持管理において留意が必要であることがわかった。
2) 撤去床版の調査より、寒冷地における鋼板接着補強床版の下面側で発生する特徴的な損傷として「アンカー部コンクリートの凍害等損傷」があることがわかった。
3) アンカー部コンクリートの損傷調査では、点検用ハンマー等による打音（音圧波形）の時間周波数特性に着目することで、損傷の有無や状態を評価できる可能性があることがわかった。
4) 曲げ損傷を有する RC 部材に対する小型 FWD による簡易たわみ計測手法では、静的載荷時と比較して部材剛性を小さく評価すること、固有振動数や衝撃荷重の作用時間を用いることで衝撃たわみを静的たわみに換算できる可能性があることがわかった。

参考文献

1) 例えば、福島誉央、甲元克明、青木康素：鋼板接着 RC 床版における損傷事例、第八回道路橋床版シンポジウム論文報告集、pp.111-114、2014.10
2) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領（案）、2004.3
3) 国土交通省道路局国道・防災課：橋梁定期点検要領、2014.6
4) 国土交通省道路局国道・技術課：橋梁定期点検要領、2019.3
5) 三田村浩、澤松俊寿、岡田慎哉、角間恒、松井繁之：46 年間供用した積雪寒冷地における道路橋 RC 床版の損傷状況の調査、土木学会北海道支部論文報告集第 69 号、A-11、2013.2
6) 繪鳩武史、蒲和也、深谷卓央：RC 床版に設置された補強鋼板の損傷実態、土木学会第 74 回年次学術講演会、VI-569、2019.9
7) 佐藤彰紀、北村耕一、薄井王尚：鋼板接着補強された既設 RC 床版の輪荷重走行試験、土木学会第 71 回年次学

術講演会、I-350、2016.9
8) 西田孝弘、茅野茂、橋本勝文、奥出信博 : 鋼板接着補強された実コンクリート床版の損傷評価、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.2、pp.1201-1206、2020.7
9) 角間恒、仁平陽一郎、畠山乃 : 模擬損傷部材による寒冷地特有の損傷が進行した実橋床版の損傷性状に関する再現実験、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、第 23 巻、pp.479-484、2023.10
10) 松井繁之、前田幸雄 : 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案、土木学会論文集、第 374 号/I-6、pp.419-426、1986.10
11) 土木学会 : 道路橋床版の維持管理マニュアル 2020、2020.10
12) 例えば、宮村正樹、岩崎正二、出戸秀明、加藤哲、早坂洋平 : 衝撃振動試験および動たわみ測定による実橋 RC 床版の健全度評価、構造工学論文集 Vol.58A、pp.1134-1143、2012.3

RESEARCH ON THE INSPECTION AND SURVEY METHOD FOR RC SLABS WITH STEEL PLATE REINFORCEMENT IN COLD REGION

Research Period: FY2021-2023
Research Team: Structures Research Team,
Cold-Region Construction Engineering Research Group
Author: HATAKEYAMA Osamu
NIHIRA Yoichiro
KAKUMA Ko
EBIKO Yasuyoshi

Abstract: This research studied the damage tendency and the survey method of RC slabs with steel plate reinforcement in cold region. In addition, as a part of study aimed to develope a method for easily evaluating the soudness of slabs, the accuracy of deflection measurements system using a porable Falling-Weight-Deflectometer (FWD) was verified through indoor loading tests. As a result, it was confirmed that frost damage to concrete around reinforcing anchors is a type of damage specific to cold regions, and that the time-frequency characteristics of hammering sounds may be useful in detecting this type of damage. Then, although it may be necessary to convert the measurment results by using natural frequencies, etc., it was also shown that the portable FWD can be used to evaluate the deflection of slabs.

Keywords: Cold region, RC slabs, Steel plate reinforcement, Inspection and survery, Portable FWD