

論文 鉄筋腐食ひび割れの進展期が各種非破壊試験の測定値に及ぼす影響

山川 莉希*1・氏家 勲*2・河合 慶有*3・大高下 弘樹*4

要旨: 本論文は鉄筋腐食によるひび割れがコンクリート表面に顕在化する前に検知する点検方法を提案することを目的として、RC供試体を電食方法により腐食促進させ、健全部と劣化部に対して各種の非破壊試験を実施し、コンクリート内部の損傷を検知可能であるかを検討した。その結果、インパルスハンマーによる圧縮強度推定試験及び4電極法による表面電気抵抗率試験では健全部と劣化部との測定値に顕著な差はなかった。一方、ダブルチャンパー法による透気試験及び非破壊による鉄筋腐食速度試験においては健全部と劣化部の測定値を比較することによりかぶりコンクリートに内在する損傷が検知可能であることが示唆された。

キーワード: 鉄筋腐食ひび割れ, かぶりコンクリート, 非破壊検査, 点検

1. はじめに

RC 構造物は十分な耐久性を有しているためにメンテナンスフリーであると考えられていたが、建設以後あまり時間が経過していない RC 構造物においても早期の劣化や損傷が顕著に見られることが指摘された¹⁾。実際に早期劣化や施工不良が原因で山陽新幹線のトンネルのコンクリート塊剥落事故が起き、RC 構造物の耐久性評価および維持管理の重要性が再認識されている²⁾。また、高度経済成長期に建設された RC 構造物の老朽化も深刻化している。老朽化の進行により、今後、維持管理・更新費用の増大が見込まれ、将来は一部の老朽構造物の維持管理費用を賄えない可能性もあるとされており^{3),4)}、適切な維持管理が行われないと、構造物の機能不全や事故を引き起こす可能性が懸念される⁵⁾。そのため、安全かつ安心な RC 構造物を維持するための適切な維持管理手法および耐久性診断技術の高度化が求められている。

国土交通省では近接目視による点検を提案している⁶⁾。目視により損傷状況の把握や評価が行われ、必要と判断された場合には補修が行われるが、これは現状の技術やかけられるコストを考慮すると現実的であるが、点検作業員の専門知識などに裏付けされた主観的判断によるものが多いため、点検結果がばらつくことが懸念されている。さらに表面に現れるひび割れなどの変状は確認できるが、コンクリート内部の欠陥といった表面からでは確認できない損傷を見つけることは非常に困難である。近接目視において構造物近くで点検が行える特徴を考慮して、上述の主観的判断による問題点を補うために、比較的簡単でコンクリート内部の損傷を非破壊でかつ定量的に評価する点検手法を確立する必要がある。

しかしながら、非破壊試験においては、例えば RC 構

造物の主たる劣化である鉄筋腐食によりコンクリートに内在するひび割れがコンクリート表面に顕在化する以前に検知可能であるかを明らかにしなければ目視点検と一緒に点検手法として有用性がない。

そこで、本研究では鉄筋腐食によるひび割れの進展期を対象とした非破壊かつ定量的な劣化評価の点検手法を提案することを目的とし、実際の橋梁桁部のどの箇所に損傷が発生しやすいのかを、愛媛県内で実施された橋梁点検の調書を用いて検討を行い、橋梁桁部を模擬した RC 桁供試体を作製し、その鉄筋を電食試験により腐食促進させた供試体を劣化部と模擬し、腐食促進させない供試体を健全部と模擬し実験を行った。そして、健全部及び劣化部で得られた各種非破壊試験の結果を比較・考察することで、コンクリート内部の損傷を検知可能であるかを検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要および使用材料

本研究では、レディーミクストコンクリートを用いて供試体を作製した。表-1 に本研究で用いたコンクリートの配合を示す。セメントには普通ポルトランドセメント(密度: 3.16g/cm³)を使用した。細骨材には、S₁(愛媛県東温市の砂岩砕砂, 表乾密度: 2.67g/cm³, 粗粒率: 2.80), S₂(大分県津久見市の石灰砕砂, 表乾密度: 2.60g/cm³, 粗粒率: 2.80), および S₃(福岡県玄海灘小呂島南西沖の海砂, 表乾密度: 2.64g/cm³, 粗粒率: 1.80) の 3 種類を混合して使用した。また粗骨材は砕石(表乾密度: 2.70g/cm³, 粗粒率: 6.60, 最大寸法: 20mm)を使用した。混和剤は AE 減水剤遅延形を使用した。スランプおよび空気量はそれぞれ 6.0cm および 5.0%とした。

*1 愛媛大学 工学部環境建設工学科 (学生会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科 教授 博(工) (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科 准教授 Ph.D. (正会員)

*4 愛媛大学大学院 理工学研究科

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a(%)	単位量(kg/m ³)						
		水 W	セメント C	細骨材			粗骨材 G	混和剤
				S ₁	S ₂	S ₃		
59.5	47.1	168	282	257	351	257	996	2.82

RC 桁供試体は3体作製し、寸法は300×250×1200mmで、図-1に概要図を示す。各RC 桁供試体にはD25鉄筋を2本ずつ埋設した。2本の鉄筋のかぶりが底面及び側面から30mm及び50mmの供試体を各1体、30mmのかぶりを有する鉄筋1本と50mmのかぶりを有する鉄筋1本を埋設した供試体を1体の計3体を作製した。前者の2体の供試体は劣化部を模擬するため電食試験に供し、後者のかぶりの異なる供試体は健全部を模擬するため電食させていない。供試体は材齢3日で脱型し、その後は屋外環境下に静置した。

2.2 電食試験

電食試験装置は、ステンレス板と供試体の間に水を浸した養生マットを置き、ステンレス板に電流を流すことで湿潤状態での電食試験を行った。そして、直流安定化電源の陰極とステンレス板、陽極と腐食側の鉄筋をそれぞれリード線で接続し、電流を印加した。また、電食試験を行っていない供試体においても同様の湿潤環境とするため水を浸した養生マットを設置した。電食試験は材齢73日目に開始し、3日間の電食試験、4日間の乾燥の計7日間を1サイクルとし電食試験及び各種非破壊試験を行った。なお、電食試験開始時から電流値は0.3A（電流密度0.031mA）に設定したが、腐食ひび割れがコンクリート表面で確認された後は腐食ひび割れの進展を抑制するため電流値を0.2A（電流密度0.021mA）に変更した。また、電食試験を開始してからの後述する各種の非破壊試験の実施に関して、表面電気抵抗率試験および鉄筋腐食速度測定試験は通電が終了し水を浸した養生マットを取り去り直後に湿潤状態のコンクリート表面で実施した。透気試験と圧縮強度推定試験は乾燥4日目に実施した。

2.3 透気試験

透気試験にはダブルチャンバー法を用いた。測定位置は図-2に示すように、鉄筋直上の表面とした。透気試験では試験前に高周波容量式の含水率計を用いて含水率を測定している。材齢57日において含水率が5%程度となったので、透気試験を開始した。なお、図-2に示す測定位置は表面電気抵抗率測定試験、圧縮強度推定試験、鉄筋腐食速度測定試験においても同じである。

2.4 表面電気抵抗率測定試験

コンクリート表面の電気抵抗率を測定することは、かぶりコンクリートの緻密さや含水状態を把握する上で有効である。本研究では、表面電気抵抗率を測定するため、

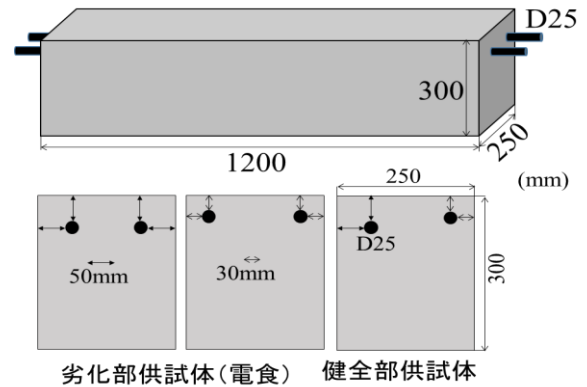


図-1 RC 桁供試体概要図

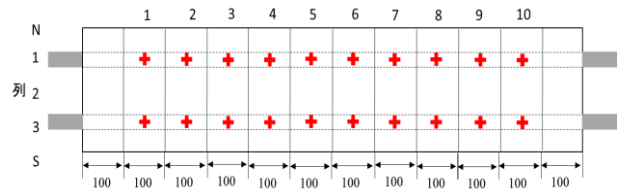


図-2 各試験の測定位置

4プローブ法を用いて、最大印加電流200μAでプローブ間隔50mmの表面電気抵抗率測定計を使用した。表面電気抵抗率の測定では、プローブを鉄筋と平行となるよう表面に設置し、各位置に対して5回測定を行った。

2.5 圧縮強度推定試験

本研究ではハンマーによる打音検査と同じように簡単に試験が行えるインパルスハンマーによる試験装置を用いた。本研究ではコンクリート内部の損傷の検知が目的であるため、測定においては各位置に対して3回測定を行った。

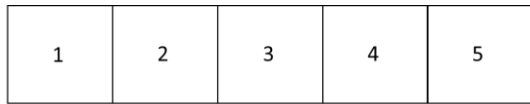
2.6 鉄筋腐食速度測定試験

本研究では鉄筋腐食速度測定のために非破壊で測定できる鉄筋腐食探知器を使用した。距離150mmの外側2つの電極に最大2.5mAの電流を印加し、内側2つの距離70mmの電極を鉄筋と平行にして電圧を測定した。鉄筋が腐食していない場合には測定された電圧は高周波よりも低周波で高くなり、鉄筋が腐食している場合、その電圧変化が小さくなることに基づいている⁸⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 橋梁点検調査

本研究では健全部と劣化部での非破壊検査結果を比較



橋脚付近 橋梁中央部

図-3 橋梁桁部区間図

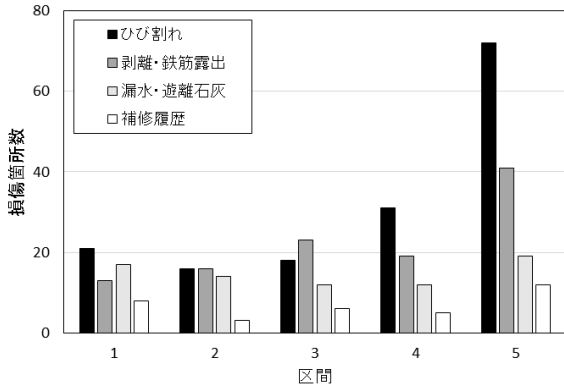


図-4 区間毎の損傷の種類と損傷箇所数

してコンクリートに内在する損傷を検知しようとする目的から、実際の橋梁桁部のどの箇所に損傷が発生しやすいのかを、愛媛県内にある PC・RC 桁橋の内、638 本の点検調書を用いて検討を行った。点検は県または市が行ったもので、点検調書の様式が同一のものを用いた。点検調書には橋梁に損傷が存在すれば、種類・箇所が詳細に記載されている。これらの調書を集計し、橋梁桁部のどの箇所に損傷が多いのか、どのような損傷があるのかを集計・考察した。対象橋梁が連続梁であった場合、損傷の集計は径間ごとに分割し各々を 1 本の橋梁とし集計した。そして、橋梁を横軸方向に図-3 に示すように 5 区間に分割した。対象橋梁の 1 径間は約 2~20m の間であった。なお、中央部の 5 以外は左右 2 か所となるので平均値とした。損傷の種類と損傷箇所数の集計結果を図-4 に示す。損傷は点検調書から「ひび割れ」「剥離・鉄筋露出」「漏水・遊離石灰」「補修履歴」に分類した。なお、ひび割れに関しては点検調書からその原因については不明である。図-4 より 1 から 4 の区間は損傷箇所数が 60 箇所前後と同程度であったが、橋梁桁中央部である 5 の区間における損傷箇所数は約 170 箇所、他区間の損傷数と比較すると 2.6~3.3 倍多いという結果となった。また、損傷の種類では区間 3 以外ではひび割れが最も多く、径間中部の区間 4 および 5 では損傷の約 50% がひび割れであった。

以上のように、橋梁桁部においては全体的に損傷が生じるのではなく、スパン中央部で損傷が発生しやすいと考えられる。このことから、径間の中において複数個所で非破壊検査を行い、ある個所での測定値が他の個所の測定値に比べて異なる挙動を示した場合に損傷が存在する可能性が考えられる。

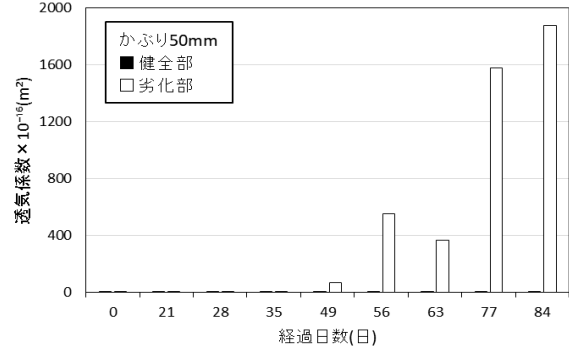
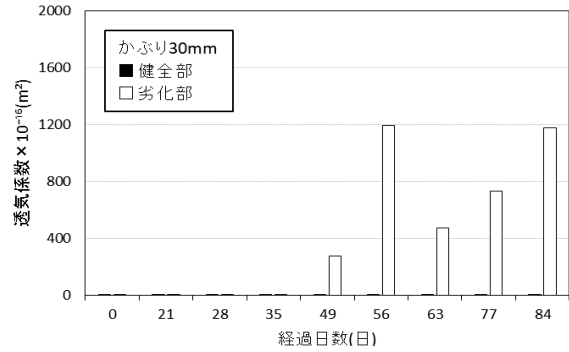


図-5 健全部及び劣化部における透気係数

3.2 RC 桁供試体についての検討

電食試験を実施した RC 桁供試体と実施していない RC 桁供試体に関して測定された各種の非破壊試験の結果を以下に示す。以下では、電食試験を施した供試体を劣化部とし、図に示す測定値は測定面全体（測定点数 20 点）より得られたものの平均値である。また、電食試験を施していない供試体を健全部とし、図に示す測定値は各かぶりの鉄筋直上（測定点数 10 点）より得られたものの平均値である。

3.2.1 透気試験

透気試験より得られた結果を図-5 に示す。上図にかぶり 30mm の供試体、下図にかぶり 50mm の供試体より得られた結果を示す。また、横軸に示す経過日数は透気試験を初めて行った材齢 58 日目を 0 日としている。従って図-5 に示す経過日数 21 日は 1 回目の電食試験が終了して乾燥 4 日目に測定した結果である。また、以下の各種非破壊試験の結果の図においても同様である。

図-5 よりかぶり 30mm 及び 50mm の劣化部において経過日数 49 日以降において透気係数が急増し、健全部と比較して明確な差がみられた。電食試験 3 サイクル目の終了後の経過日数 46 日において鉄筋軸方向のひび割れが確認された。透気試験はひび割れの存在する面に適用すると外部からの空気がひび割れ部から流入するため、透気係数は急増することが知られている。46 日目に確認できたひび割れの幅は約 0.03mm と微細であったが、劣化部の透気係数の経時変化あるいは健全部と劣化部から

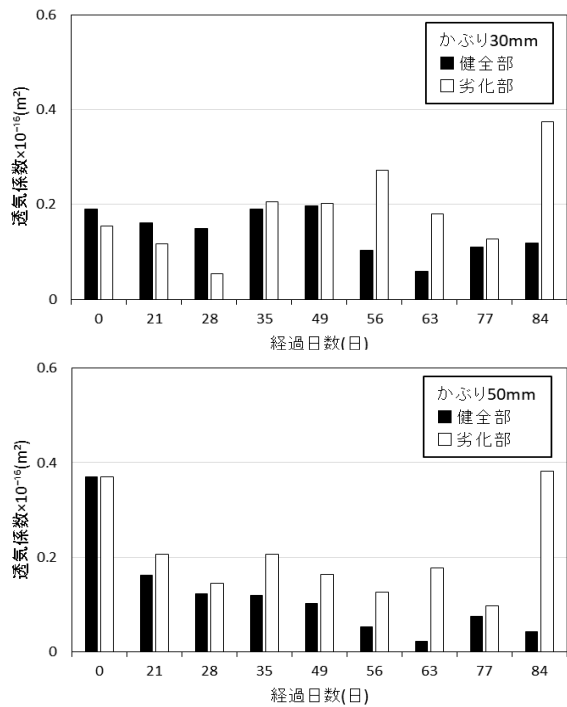


図-6 健全部及び劣化部の測定値から変状の
見られた箇所の測定値を除いた結果の比較

得られた透気係数を比較することで微細なひび割れの存在に対しても明確な変化を検知することができた。

しかし、本実験の目的は損傷がコンクリート表面に顕在化する以前に検知することである。そこで、図-5の測定結果から変状(本実験においてはひび割れ)が目視で認められた箇所の測定値を除き、変状の認められなかった箇所から得られた測定値の平均値を図-6に示す。

図-6より電食試験を実施する以前の0日目での試験では、かぶり30mm及び50mmそれぞれにおいて健全部及び劣化部の測定値は同程度であった。しかし、かぶり30mmでは56日目以降、かぶり50mmでは電食試験1サイクル実施の21日以降において劣化部から得られた測定値が健全部の測定値より大きくなり、84日目での試験では各かぶりで、より明確な差が認められた。また、健全部および劣化部の透気係数は経時的に変動している。健全部および劣化部のどちらの供試体も水を浸した養生マットを3日間コンクリート表面に設置するが、供試体は屋外に置いてあるため、屋外環境の変化すなわち日射や降雨によりコンクリートの含水率が変化するため、既往の研究で報告されているように⁹⁾、透気係数も変動したと考えられる。従って、透気係数の経時的な増加の観点からは損傷を評価しづらいが、健全部との劣化部の透気係数を比較することにより外環境の影響を受けることなく損傷を評価できると思われる。

3.2.2 表面電気抵抗率測定試験

図-7は健全部と劣化部で測定された電気抵抗率を示

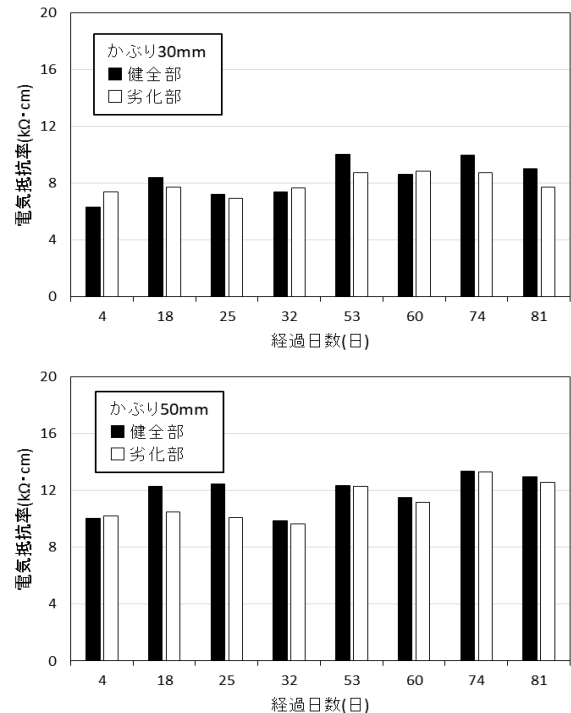


図-7 健全部及び劣化部における電気抵抗率

す。なお、図-7においてはひび割れが確認された後も全ての測定結果の平均値を示している。図からわかるように健全部と劣化部の電気抵抗率の経時変化に顕著な差がみられない。また健全部と劣化部を比較しても、ひび割れを含んでいる経過日数53日以降の測定値にも差はみられず、電気抵抗率は健全部と劣化部でほぼ同じか健全部のほうが少し大きい場合もある。一方、かぶり30mmの電気抵抗率はかぶり50mmの測定値より、健全部及び劣化部のいずれも小さな値となっている。これは鉄筋が印加した電流の通路の一部となったことが考えられ、これにより腐食ひび割れの影響が電気抵抗率にあまり影響しなかったと考えられる。なお、劣化部の電気抵抗率の測定値からひび割れが目視で認められた箇所の測定値を除いた場合でも図-7とほぼ同じであったため、図示していない。

3.2.3 圧縮強度推定試験

図-8はインパルスハンマーによる試験装置を用いて推定した健全部および劣化部の圧縮強度を示す。かぶり30mmにおいて、電食試験を行う以前の初期値では健全部と比較すると劣化部の方が同程度かやや大きいと言えるが、電食試験を行った以降は劣化部の方が健全部より圧縮強度の推定値が小さくなっている。特に、ひび割れを確認できた46日目以降では劣化部の圧縮強度の推定値は低下する傾向にあり。健全部の測定値との差が広がっている。一方、かぶり50mmにおいても、ひび割れを確認できた46日目以降は健全部と比較すると劣化部の

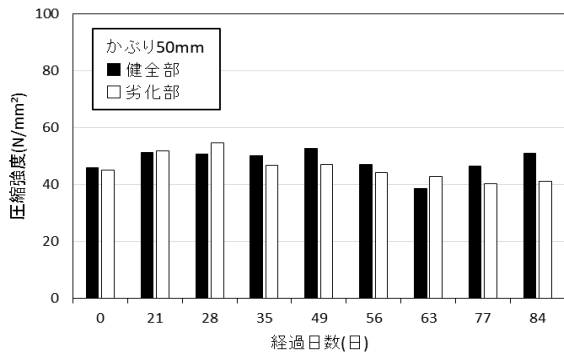
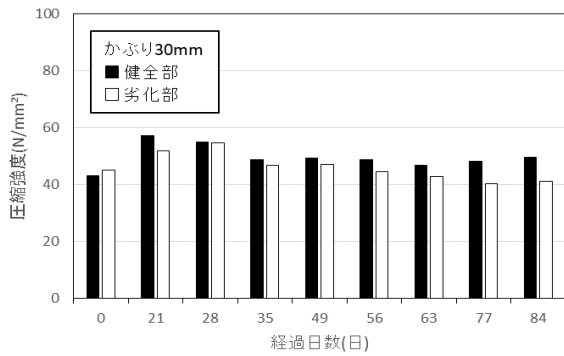


図-8 健全部及び劣化部における圧縮強度推定値

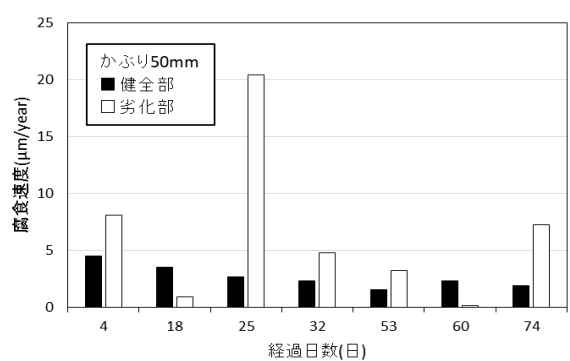
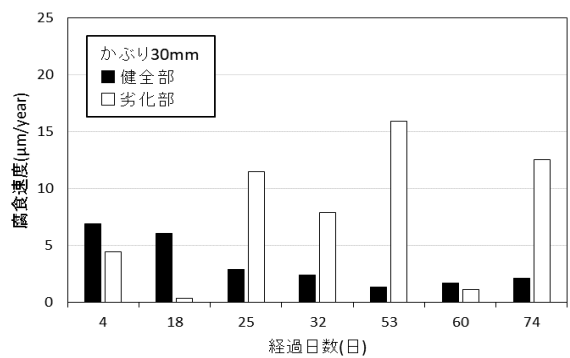


図-10 健全部及び劣化部における鉄筋腐食速度

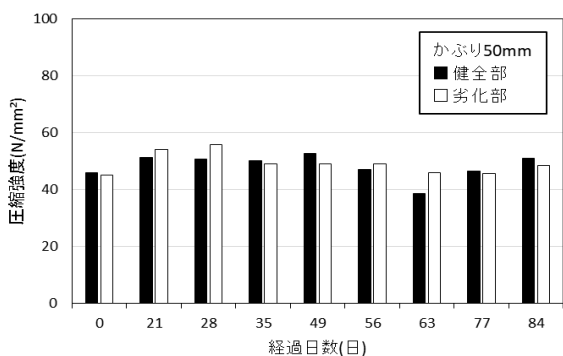
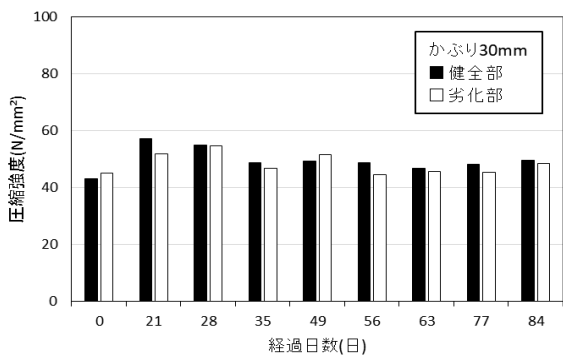


図-9 健全部及び劣化部の測定値から変状の
見られた箇所の測定値を除いた結果の比較

方が 63 日目以外では小さくなっている。このことから、インパルスハンマーによる強度推定試験は、健全部と劣化部から得られた測定値を比較することで損傷の存在の検知は可能であると考えられる。

しかし、本実験の目的はひび割れをコンクリート表面に顕在化する以前に検知することである。そこで、3.2.1

で示した図-6 と同様に図-8 の値から変状(ひび割れ)が目視で認められた箇所の測定値を除き、変状の認められなかった箇所から得られた測定値の平均値を劣化部の値として、図-9 に示す。

図-8 を図-9 と比較すると 46 日目以降での健全部の圧縮強度の推定値と劣化部の推定値を比較すると、両者の推定値はほぼ同じか、劣化部の推定値のほうが小さくなっている。以上のことから、インパクトハンマーを用いた試験方法で健全部と劣化部でのコンクリート強度の推定値を比較することで表面に顕在化したひび割れは検知できると考えられるが、腐食ひび割れの進展によるコンクリートに内在する損傷の検知は困難であると考えられる。

3.2.5 鉄筋腐食速度測定試験

図-10 は健全部および劣化部における鉄筋腐食速度の推定値を示す。かぶり 30mm 及び 50mm とともに電食試験を行う前の鉄筋が腐食していない段階において、約 5~8µm/year の腐食速度が推定されている。これらの値は不活性あるいは遅いと判断されるが、測定誤差の範囲と思われる。この試験方法の原理から、電圧を測定しておりコンクリートの電気抵抗の影響を受けると考えられる。経過日数 4 日の測定は電食試験を開始する前で、RC 供試体はダブルチャンバー法で透気係数が測定できる程度に乾燥した状態になっておりその影響によるものと思われる。健全部の RC 供試体では通電は行っていないが、水を浸した養生マットをコンクリート表面に置いたため、かぶり 30mm および 50mm どちらにおいても腐食速度が

小さくなる傾向にある。一方、劣化部においては電食試験 2 回目後の経過日数 25 日において腐食速度が急増している。かぶり 30mm では経過日数 60 日を除いて大きな値であることから腐食していると評価できるが、かぶり 50mm では腐食速度が減少しており、腐食しているとは判定しづらい。しかしながら、健全部の測定値と劣化部の測定値を比較すると劣化部の方が大きくなっていることから、より鉄筋が腐食していると評価することが可能であると考えられる。なお、図-10 に関しても、変状(ひび割れ)が目視で認められた箇所の測定値を除き、変状の認められなかった箇所から得られた測定値の平均値を劣化部の値としても図-10 とほぼ同じである。

以上のように、経時的な変化の観点のみからにおいては実構造物のように降雨や温度・湿度変化などの環境条件の変化により非破壊検査の測定値が変動するためコンクリート内部の損傷を検知することが困難な場合もある。しかし、透気試験および鉄筋腐食速度測定試験において、複数箇所測定して健全な部分と劣化した部分での測定値を比較することで腐食ひび割れによるコンクリートに内在する損傷検知の可能性が示唆された。ただし、今回の実験では非破壊試験で損傷を検知したと思われる箇所で腐食ひび割れが内在していたか確認する必要がある。また、それぞれの試験において健全な部分と劣化した部分での測定値の差についてはデータを蓄積する必要がある。

4. 結論

本研究では、RC 供試体に電食試験を施し、鉄筋腐食を促進させた供試体を劣化部、劣化促進させない供試体を健全部と模擬し実験を行い、健全部と劣化部で得られた非破壊試験の測定結果を比較・検討することで、腐食ひび割れによるコンクリート内部の損傷を検知可能であるかを検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) 愛媛県内の PC・RC 桁橋を対象に各橋梁点検調査を集計した結果、橋梁桁中央部の損傷箇所数はその他の区間における損傷箇所数より 2.6~3.3 倍多く、損傷の種類ではひび割れが約 50% を占めている。
- 2) 透気試験において、0.03mm 程度の微細なひび割れでも、それを含む表面で測定すれば透気係数は急増する。また、腐食ひび割れが表面に顕在化していない場合には、透気係数の経時的な変化からではなく、複数箇所測定された透気係数を比較することでコンクリートに内在する損傷を検知できることが

示唆された。

- 3) 表面電気抵抗率測定において、鉄筋腐食によるひび割れがコンクリート表面に顕在化した場合においても、鉄筋の影響のために劣化部と健全部から得られた測定値に損傷による差はみられなかった。
- 4) インパクトハンマーを用いた強度推定試験において、腐食ひび割れがコンクリート表面に顕在化した場合には劣化部と健全部の測定値に差が生じるが、内在している場合はほぼ同じ測定となる。
- 5) 腐食速度測定試験において、腐食ひび割れが表面に現れなくても劣化部と健全部の測定値の差が明確に認められ、健全部と劣化部の内部鉄筋の腐食速度を測定し比較することでコンクリートに内在する損傷の検知の可能性が示唆された。

参考文献

- 1) 小林一輔：コンクリート構造物の耐久性診断技術-現状と課題-，東京大学学術機関リポジトリ 生産技術研究所 生産研究，39 巻 3 号，pp.83-91，1987
- 2) 佐々木孝彦：コンクリート構造物の鉄筋腐食による劣化の診断と補修に関する研究，第 1 章 序論，pp.1-15，2005
- 3) 国土交通省：維持管理・更新費用の将来推計の考え方，第 1 回社会資本メンテナンス戦略小委員会資料 3，2012
- 4) 池田一壽：道路構造物のストックマネジメントのための技術動向，科学技術動向，5 月号，pp.20-27，2007
- 5) 国土交通省：社会資本の適確な維持管理・更新，国土交通白書 2012，第 1 部，2012
- 6) 定期点検に関する省令・告示 公布(H26.3.31)
- 7) R.J.Torrent：A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site，Materials and Structures，Vol.25，pp.358-365，1992
- 8) KEYTEC(株)：https://www.key-t.co.jp/resources/icor/ コンクリート内の鉄筋腐食を完全非破壊で知る技術(完全非破壊型鉄筋腐食探知器 iCOR Giatec 社)
- 9) 村上賢晃，氏家勲，河合慶有：自然環境下の表層コンクリートに対する透気試験を用いた耐久性性能推定手法の適用可能性，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.2007-2012，2016