

劣化したコンクリート部材の表面及び内部の実損傷状態と非破壊検査出力値

の関係把握のための基礎研究

玉井宏樹¹、園田佳巨²

¹九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 助教

²九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門 教授

概要：RC 構造物を適切に維持管理していくためには、点検診断から耐荷性能評価まで一貫性を有した維持管理技術の確立が重要である。そこで、本研究では、電食法により鉄筋を腐食させた RC 部材に対して非破壊検査や載荷実験を実施することで、①目視で確認できる実際の劣化状態、②打音などの非破壊検査値、③耐荷性能といった三者の関係性の解明に向けた基礎検討を実施した。

1. はじめに

我が国は経年劣化による社会基盤施設の老朽化が問題となっており、国としても戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）を通して、検討が本格化してきているものといえる。研究という観点からインフラ施設の維持管理分野を概観すると、非破壊検査による点検・診断法、劣化した部材・構造物の耐荷性能の評価、補修・補強工法の有効性などの分野で多くの研究が実施されており、知見も多く得られているが、それぞれの分野を統一的に俯瞰した研究はあまり多くない。実際に、RC 構造物などのインフラ施設を適切に維持管理していくためには、近接目視や非破壊検査による点検診断から耐荷性能評価まで一貫性を有した維持管理技術、つまり、上述の3分野を統一的に捉えた技術検討が必要であるといえる。

そこで、塩害や中性化によって劣化した RC 構造物の合理的な維持管理技術の確立を最終的な目標として、本研究では、鉄筋腐食した RC 梁や版を製作し、その部材表面状態から目視で得られる情報や腐食による鉄筋の質量減少率などの実損傷情報と、非破壊検査（自然電位や打音法）によって得られる内部状態の損傷情報との関係を実験により明らかにすることが第一の目的である。また、同時に、載荷試験を実施することで耐荷性能も出力することで、①目視で確認できる実際の劣化状態（表面状態）、②打音などの非破壊検査値（内部状態）、③耐荷性能といった三者の関係を明らかにする。

2. 供試体概要

まず、図-1 に RC 梁の概要図を記す。供試体の寸法は 100×120×1200mm であり、載荷試験時

の支点間距離は 1000mm である。断面はせん断補強筋を有する複鉄筋長方形断面であり、引張鉄筋には D10（SD295A）を 2 本、圧縮鉄筋には φ6（SR295）を 2 本、せん断補強鉄筋には φ6（SR235）を用いた。主鉄筋からのかぶりは底面、側面共に 25mm であり、せん断補強筋の配置間隔は 100mm である。

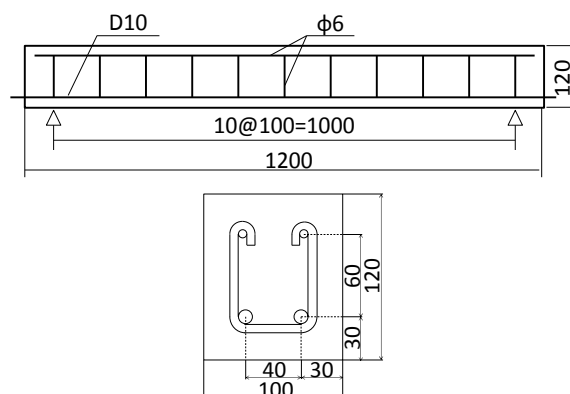


図-1 RC 梁供試体の概略図（単位：mm）

次に、図-2 に RC 版供試体の概略図を示す。供試体の寸法は 600×600×80mm であり、載荷試験時の支点間距離は 500mm である。鉄筋は D10（SD295D）を 5 本ずつ格子状（合計 10 本）に配置している。また、主鉄筋からのかぶりは底面 20mm、側面 50mm であり、鉄筋間隔は 125mm である。また、RC 梁、RC 版のどちらの供試体も電食法により鉄筋を腐食させるため鉄筋の一部をコンクリートから張り出している。なお、RC 梁は引張側主鉄筋のみを電食法による腐食対象としたため、引張側主鉄筋とせん断補強筋の間には絶縁処理を施した。一方、RC 版に関しては格子状に配された全ての鉄筋を腐食対象と

した。

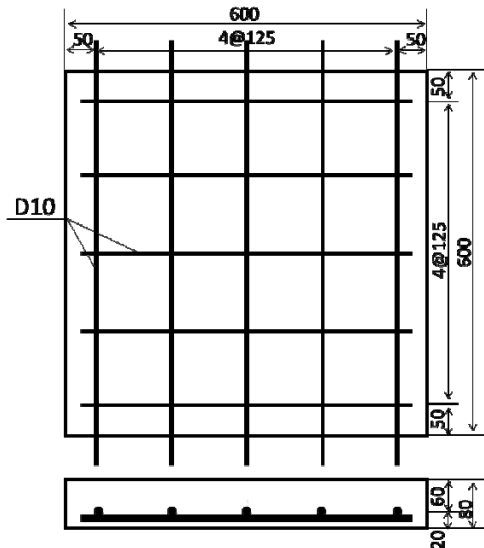


図-2 RC 版供試体の概略図 (単位: mm)

コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108) および、静弾性係数試験方法 (JIS A 1149) に基づいて測定したコンクリートの実験時材齢による圧縮強度は45.5MPa、引張強度は2.6MPa、静弾性係数は30254MPaであった。なお、これらは3体の平均値である。一方、単軸引張試験により測定した鉄筋 (D10, SD295A) の降伏応力は358MPa、引張強度は491MPa、静弾性係数は188000MPaであった。なお、これらも3体の平均値である。

3. 電食法による促進劣化

本研究では鉄筋が腐食した供試体を作製する必要がある。鉄筋コンクリートを強制的に腐食させる方法には、電食法、腐食促進環境あるいは自然環境での暴露、乾湿繰返し、塩水噴霧などが挙げられる。本研究では、既往の研究において実施例が多く、比較的早期に目標とする腐食レベルが得られ、その制御も容易とされている電食法を採用した。電食法の概略図を図-3に示す。この図に示すように電食法は鉄筋を陽極、銅板を陰極とすることで鉄筋をイオン化させて劣化を促進させるものである。具体的には鉄筋と直流電源装置の+極、銅板と直流電源装置の-極をそれぞれリード線で接続し、RC梁供試体のかぶりコンクリートを3%NaCl水溶液に浸漬した後に、電流を印加する。これによって、直流電源装置→鉄筋→3%NaCl水溶液→銅板→直流電源装置という回路が形成され、鉄筋の腐食が進行する。印加電流は0.7Aであり、腐食程度は通電時間により制御した。なお、写真-1に電食槽でのRC梁の電食の様子を記す。

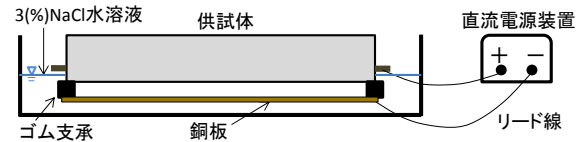


図-3 電食法による促進劣化試験の概要図



写真-1 電食の様子

表-1に供試体別の目標腐食率を記す。RC梁に対しては、目標腐食率を5, 10, 15, 20 (%)の4通り、RC版に対しては、目標腐食率を5, 15 (%)の2通りと設定して、通電時間によって調整した。

表-1 供試体別の目標腐食率

供試体	腐食レベル	目標腐食率 (%)
健全	レベル0	腐食無し
腐食 RC 梁	レベル1	5
	レベル2	10
	レベル3	15
	レベル4	20
腐食 RC 版	レベル1	5
	レベル2	10

4. はつり調査による実腐食率

本研究では、鉄筋の腐食程度を評価するために、非破壊試験及び載荷試験終了後の供試体をはつり、鉄筋の腐食率を測定した。腐食率の測定はJCI「コンクリート中の鋼材の腐食評価法」に基づいて実施した。具体的にはまず、採取した引張鉄筋をスパン長で切断し、腐食生成物を除去するために10%クエン酸二アンモニウム水溶液に72時間浸漬した。浸漬後はたわしを用いて付着している腐食生成物を洗い落とし、十分に乾燥させ、質量を測定することで腐食率を算出した。算出した各供試体の腐食率を表-2および表-3に示す。表からわかるように、ほぼすべての供試体で目標腐食率を下回っていることが確認できる。これは電流が鉄筋張り出し部の局所腐食やせん断補強筋の腐食に使われたためで

あると考えられる。また、RC 版では縦方向と横方向の鉄筋で腐食率に大きく違いが生じていることから、横方向への電流の通電が不十分であったことが考えられる。以降の結果では、目標腐食率ではなく、実腐食率との関係について述べる。

表-2 RC 梁供試体の実腐食率

腐食 レベル	供試体 No.	目標 腐食率(%)	実 腐食率(%)
レベル 1	5-B	5	2.2
	5-C	5	2.3
	5-D	5	1.7
	5-E	5	1.1
	5-F	5	2.3
	5-H	5	3.4
レベル 2	10-A	10	5.3
	10-C	10	5.0
レベル 3	15-A	15	7.1
	15-C	15	8.0
	15-D	15	12.8
	15-E	15	8.6
	15-H	15	6.8
レベル 4	20-D	20	16.4

表-3 RC 版供試体の実腐食率

腐食 レベル	供試体 No.	目標 腐食率 (%)	実腐食率(%)		
			縦	横	全体
レベル 1	5-A	5	3.9	0.8	2.3
	5-B	5	4.1	1.4	2.7
	5-C	5	3.3	0.4	1.9
	5-D	5	2.5	0.6	1.6
レベル 2	15-A	15	7.7	2.7	5.2
	15-B	15	8.4	3.8	6.1
	15-C	15	7.1	2.8	4.9
	15-D	15	5.7	2.5	4.1

5. 目視によるひび割れ調査

まず、電食法により促進劣化させた RC 梁供試体の外観をレベル毎に代表 1 体ずつを図-4～図-7 に示す。図中の上から右側面、底面、左側面を表す。電食試験において通電時間が長い供試体ほど引張鉄筋に沿ったひび割れが顕著であり、錆汁による供試体の変色も明確であった。また、腐食レベル 2 の供試体においては、主鉄筋に沿ったひび割れが底面で発生している箇所

と側面で発生している箇所が存在し、それらが全スパン方向に繋がるという傾向がみられたが、これは腐食生成物による膨張圧が作用することによって、コンクリートの引張に対する抵抗が最も弱い面にひび割れを生じさせ、そのひび割れから腐食生成物が流出することで膨張圧が解放されたためであり、本研究で作製した RC 梁のかぶりは、底面と側面とで同程度であることからこのような傾向が生じたものといえる。なお、腐食レベル 3 以上の供試体においては全スパン方向に繋がったひび割れ以外にもひび割れが生じていることが確認できた。

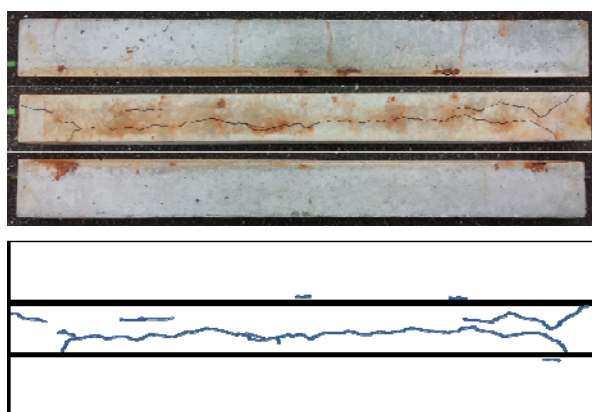


図-4 腐食レベル 1 (5-H) の供試体外観図

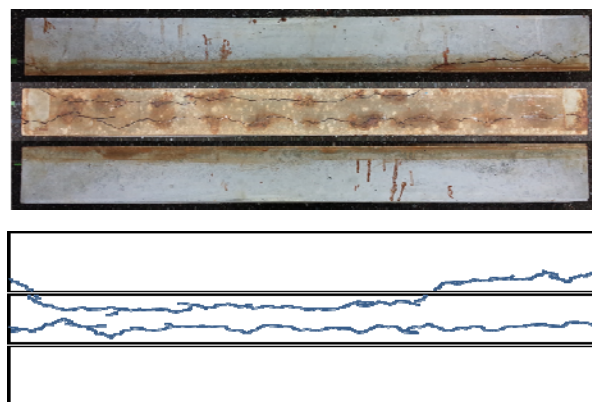


図-5 腐食レベル 2 (10-C) の供試体外観図

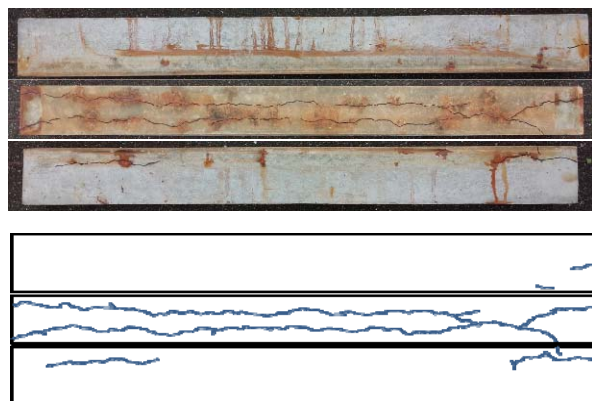


図-6 腐食レベル 3 (15-C) の供試体外観図

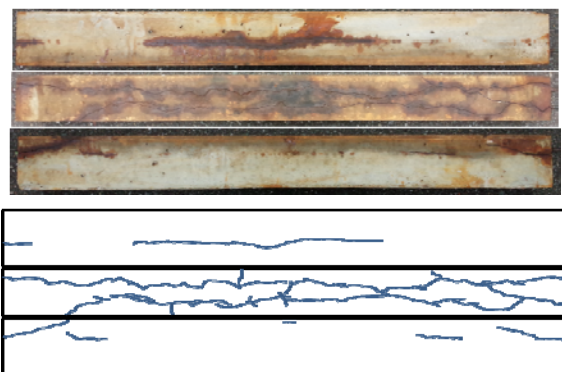


図-7 腐食レベル 4（20-D）の供試体外観図

また、表-4 に各供試体における平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅を示す。ここで、平均ひび割れ幅は、各供試体底面 10 箇所でのひび割れの平均である。表からわかるように、腐食レベル 1, 2, 3 では平均ひび割れ幅、最大ひび割れ幅ともにさほど差がみられないため、ひび割れ幅より腐食生成物量やひび割れ範囲等を重視する必要があると考えられる。しかし、明らかに腐食レベル 3 の方が腐食の進行が顕著であるように見えるため、ひび割れ幅を計測した箇所が少なかったのが原因である可能性もある。しかし、レベル 4 では平均ひび割れ幅、最大ひび割れ幅ともに著しく増加していることから、これ程のひび割れ幅が出れば、かなり鉄筋腐食が進行していると推測できる。

表-4 実腐食率とひび割れ幅

腐食レベル	腐食 No.	実腐食率 (%)	平均ひび割れ幅 (mm)	最大ひび割れ幅 (mm)
Lv.1	5-B	2.2	0.12	0.25
	5-C	2.3	0.05	0.40
	5-D	1.7	0.13	0.45
	5-E	1.1	0.12	0.45
	5-F	2.3	0.19	0.50
	5-H	3.4	0.06	0.40
Lv.2	10-A	5.3	0.16	0.45
	10-C	5.0	0.14	0.40
Lv.3	15-A	7.1	0.16	0.30
	15-C	8.0	0.20	0.45
	15-D	12.8	1.01	2.20
	15-E	8.6	0.23	0.25
	15-H	6.8	0.11	0.65
Lv.4	20-D	16.4	0.29	1.90

次に、同様に RC 版供試体の外観をレベル毎に代表 1 体ずつを図-8、図-9 に示す。RC 梁と同

様に通電時間の増加によってひび割れの範囲が拡大することがわかる。腐食レベル 1 の供試体では、縦方向のひび割れがみられ、腐食レベル 2 では横方向のひび割れもみられた。

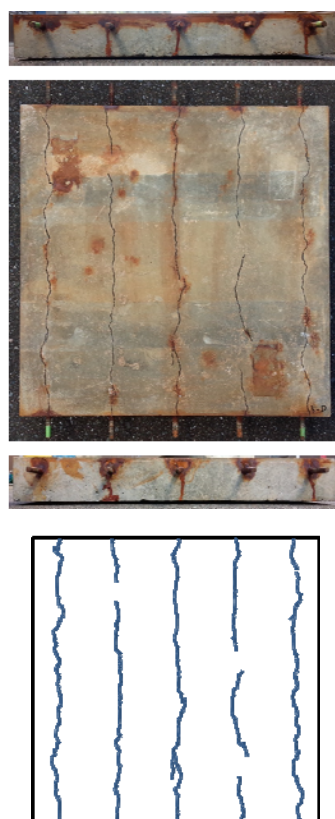


図-8 腐食レベル 1（5-D）の供試体外観図

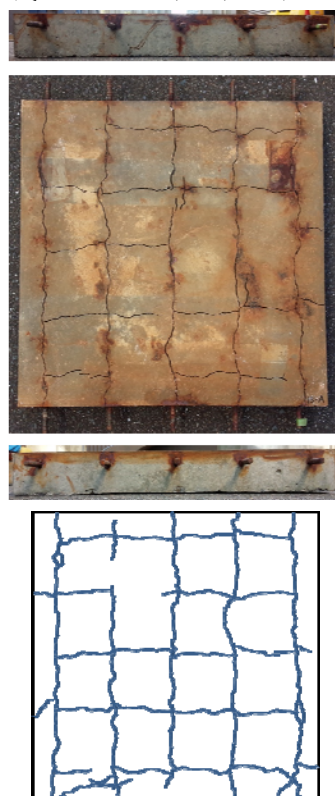


図-9 腐食レベル 2（15-B）の供試体外観図

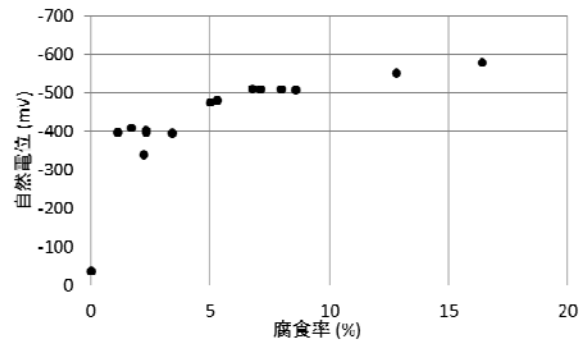
また、表-5 に各供試体における平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅を示す。ここで、平均ひび割れ幅は各供試体底面 25 箇所でのひび割れの平均である。表-5 より腐食率の増大によってひび割れ幅が増大することが明瞭に確認できる。

表-5 実腐食率とひび割れ幅

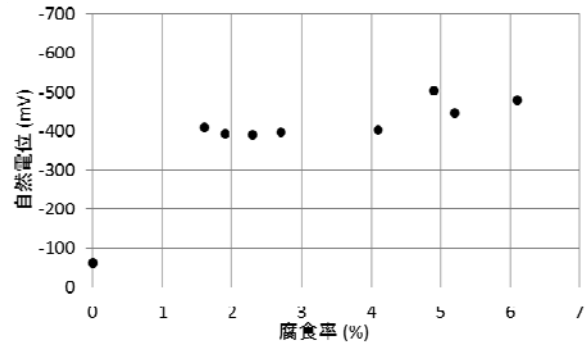
腐食レベル	供試体 No.	実腐食率 (%)	平均ひび割れ幅(mm)		最大ひび割れ幅(mm)
			縦	横	
Lv.1	5-A	2.3	0.06	0.003	0.10
	5-B	2.7	0.04	0	0.10
	5-C	1.9	0.05	0	0.10
	5-D	1.6	0.06	0	0.10
Lv.2	15-A	5.2	0.23	0.09	0.45
	15-B	6.1	0.15	0.05	0.45
	15-C	4.9	0.11	0.02	0.30
	15-D	4.1	0.12	0.02	0.50

6. 自然電位法および打音法による非破壊検査

まず、自然電位法はコンクリート中の鉄筋の腐食状況を、自然電位を測定することで推定しようとするものである。原理としては、鉄筋が腐食しているアノード部の電位は卑側（一側）に変化するため、自然電位法ではこの負の電荷を検出することで鉄筋腐食の推定を行っている。測定は、梁供試体においては底面 10 箇所、版供試体においては底面 9 箇所で行う。測定結果から得られた自然電位と腐食率の関係を図-9 に示す。まず、表より腐食している供試体の自然電位は腐食していない供試体の自然電位より明らかに小さく、明確に差異が表れていることがわかる。ASTM C 876 では自然電位が-350mV 以下の場合 90%以上の確率で腐食があるという基準を設けているが、腐食率が最も小さい 1.1%の供試体においても-350mV 以下となっていることが確認できる。また、図より、腐食率が大きくなるにつれて、自然電位は減少傾向であることがわかるが、腐食していない供試体の自然電位は腐食供試体の自然電位に比べて非常に大きいことが確認できる。よって、自然電位は鉄筋の腐食によって急激に減少し、その後の腐食率増加に伴う自然電位の減少率は小さいことが確認できる。



(a)RC 梁の場合



(b)RC 版の場合

図-9 実腐食率と自然電位の関係

次に、本研究では従来のインパルスハンマーによる打音法ではなく、回転式打音法を実施した。回転式打音法とは写真-2 に示すようなロッド先端に金属性の回転部が取り付けられた検査器をコンクリート表面に押し付けながら回転させ、多面体が回転する衝撃で発生する打撃音を利用した手法である。本手法は打撃力のばらつきを低減することが可能であるため、検査者の熟練度等に関わらず、一貫性のある評価を行うことができる。測定には、FFT アナライザー、回転式打音検査器、マイクロホンを用いた。本研究では、検査により得られた音圧時刻歴波形から求めた単位時間当たり面積(Pa)（以後、出力値とする）を用い劣化程度を評価した。



写真-2 回転式打音法の概要

本検査では、供試体スパン中央部の底面と側面の2箇所を測定した。得られた出力値と実腐食率の関係を図-10に示す。図-10より、底面での測定結果である出力値の近似直線が右肩上りになっていることから、腐食率の増加に伴い、出力値も増加する傾向にあることがわかる。この出力値は大きくなればなるほど内部欠陥レベルが高いとされているため、この傾向は適切な結果ではあるものの、近似線からのばらつきが大きく、また、側面でもひび割れが発生していたにも関わらず、側面における測定結果の値は差がないことから、一概に本手法により腐食率と打音法による出力値の関係を明らかにできたとは言い難い。このような結果となった一因として、鉄筋腐食が顕著に現れている位置といったような供試体ごとの内部劣化状況は異なるにも関わらず、測定は同一の位置で行ったことが考えられる。本研究における劣化調査を行うにあたっては、さらに多くの箇所において測定を行い、サンプル数を増やすことで、腐食率と出力値の関係性をより明確にすることが可能であったと推測できる。

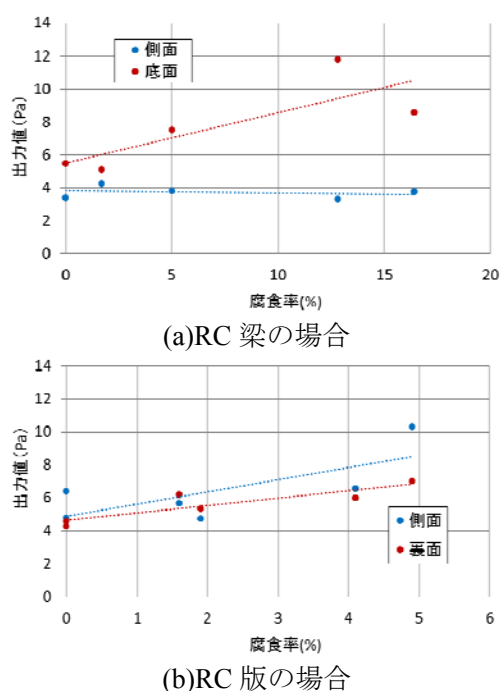


図-10 実腐食率と打音検査出力値の関係

7. 載荷試験

鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の耐荷力は腐食率が比較的大きい 10%以上でもさほど低下しないことがわかっているため、本研究における載荷試験方法としては、重錘を部材が破壊するまで繰返し衝突させる方法を採用した。(図-11 参照) なお、使用した重錘の質量は 100kg

で衝突速度は 1m/s とし、累積残留変位が RC 梁のスパンの 1% (10mm) に達した場合を終局と定義し、載荷を終了した。ここでは、RC 梁に対する載荷試験の結果のみを記す。表-1 には、実腐食率と破壊までの繰返し衝突回数の関係を記す。これより、衝突速度 1m/s では劣化程度が増大するに伴い、終局に達する繰返し衝突回数が著しく減少することがわかる。よって、劣化程度が増大により RC 梁の弾性域が大幅に減少しているといえ、腐食率が 1%であっても耐衝撃性能は 30%低下することが確認できることから鉄筋腐食による劣化が耐衝撃性能の低下に与える影響はかなり大きいといえる。

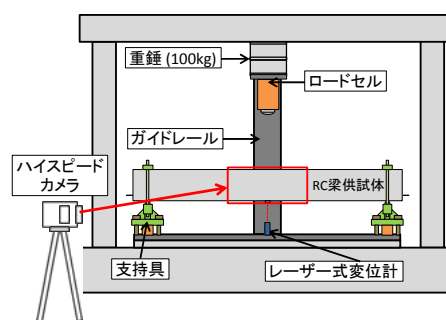


図-11 落錐式衝撃試験の概要図

表-3 実腐食率と破壊までの繰返し衝突回数

腐食レベル	供試体 No.	実腐食率 (%)	破壊までの衝突回数(回)
健全	0-C	0	85
Lv.1	5-E	1.1	56
Lv.2	10-A	5.3	52
Lv.3	15-D	12.8	14
Lv.4	20-D	16.4	24

8. まとめ

本研究では、鉄筋腐食による実腐食率と、表面損傷情報であるひび割れ幅、打音法や自然電位法から得られる非破壊検査出力値、さらには、繰返し衝撃載荷試験から得られる破壊までの繰返し回数との関係を明らかにした。しかし、最終的な目標で設定していた三者関係の把握のためには、同様な検討をさらに進めていく必要があるといえる。

謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会による平成 29 年度「建設技術研究助成」による助成金交付により遂行したものである。ここに、謝意を表します。