九州大学学術情報リポジトリ
Kyushu University Institutional Repository

鉄筋腐食により劣化したRC梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎的研究

玉井, 宏樹
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 助教

桑原, 功旺
九州大学大学院工学府建設システム工学専攻 : 修士課程

園田, 佳巨
九州大学大学院工学研究院社会基盤部門 : 教授

https://hdl.handle.net/2324/4793193

出版情報 : Journal of structural engineering. A. 63A, pp.1224-1236, 2017-03. Japan Society of Civil Engineers
バージョン :
権利関係 :

KYUSHU UNIVERSITY

鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する基礎的研究

Static and impact load resistant capacity of RC beams damaged by corrosion of reinforcement

玉井宏樹†，桑原功旺*，園田佳巨**
Hiroki Tamai, Isao Kuwahara, Yoshimi Sonoda

†博（工），九州大学大学院助教，工学研究院社会基盤部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地）
*九州大学大学院修士課程学生，工学府建設システム工学専攻（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地）
**工博，九州大学大学院教授，工学研究院社会基盤部門（〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地）

Corrosion of embedded reinforcements is a serious problem for some protective RC structures such as rock-shed along the coastline. The purpose of this study is to get fundamental findings regarding impact load resistant capacity of RC beams damaged by corrosion of reinforcement. So, in this study, both of static loading test and repeated impact test for RC beams damaged by corrosion of reinforcement were conducted. As the result, the relationship between degradation level and impact load resistant capacity was clarified. In addition, FE analysis considering the reduction of cross-sectional area of reinforcement and decrease of bond strength was conducted. As the result, it was confirmed that the effect of corrosion was qualitatively evaluated by using the proposed model.
Key Words: RC beam, corrosion of reinforcement, impact loading test, FE analysis
キーワード：RC 梁，鉄筋腐食，衝撃試験，有限要素解析

1. 緒言

笹子トンネルの天井板崩落事故に代表されるように，近年，社会基盤施設の老朽化に伴う問題が数多く報告されており，維持管理に対する関心が急速に高まっている．鉄筋コンクリート（以降，RC と称す）構造物の代表的な劣化としては，中性化や塩害などの化学的な劣化，あるいは繰り返し荷重が作用することで生じる損傷などが挙げられるが，このような劣化性状と構造性能の関係を明確にすることは喫緊の課題であるといえる．特に四方を海で囲まれている我が国では，塩害に起因するコンクリート構造物内部の鉄筋腐食による劣化が顕著であり，鉄筋腐食により劣化した RC 構造物の残存耐力を適切に評価することは，構造性能の評価，補修・補強の工法や時期の選定，構造物の劣化予測などにおいて非常に重要であるとともに，持続可能で合理的な維持管理技術の構築には必要不可欠である．このような背景の下，これまでに鉄筋腐食により劣化した RC 部材や構造物を対象とした数多くの実験的研究[1)~11)]がなされ，特に，RC 梁部材の曲げやせん断に対する耐荷力については多くの有用な知見が蓄積されつつある．しかし，それらの多くは静的荷重を対象としており，動的荷重を対象とした研究については，耐震性に関するもの[12),13)]がいくつか存在するが，自然災害に含まれるような衝撃的な荷重に関する研究はほとんど行われておらず知見不足であることは否めない．衝撃的な荷重が作用する代表的な RC 構造物として，ロックシェッドや防護擁壁が挙げられるが，これらの多くは設計時に十分な安全余裕度を保持するように設計されているものの，急崖地直下の海岸沿いに設置されており，塩害の影響を受けやすく，劣化損傷が顕在化する可能性は高い．現状では，静的荷重を対象に得られた知見をこれらの構造物に適用できるか否かもわかっていないため，鉄筋腐食による劣化が耐衝撃性能に及ぼす影響を部材レベルで明らかにしていくことは，維持管理技術の向上という観点のみならず，防災という観点からも極めて重要である．

そこで，本研究では，鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の耐衝撃性能に関する基礎的資料を得ることを目

† 連絡著者 / Corresponding author
E-mail: tamai@doc.kyushu-u.ac.jp

的とし，まず，電食法による促進劣化によってスパン方向に一様腐食させた RC 梁試験体を製作し，静的載荷試験を実施することで，曲げ耐荷性能や付着性能といった部材の基本特性に腐食率が及ぼす影響を検討した．次に，腐食率が同一の試験体に対して，繰り返し衝撃試験を実施することで，腐食率と耐衝撃性能の関係を明らかにするとともに，破壊性状に及ぼす腐食ひび割れの影響について検討した．さらに，鉄筋腐食による力学性能の低下を考慮した FEM 解析のモデル化を提案し，その解析モデルの妥当性および適用性について検討した．

2. 鉄筋腐食した RC 梁試験体の製作およびその劣化程度

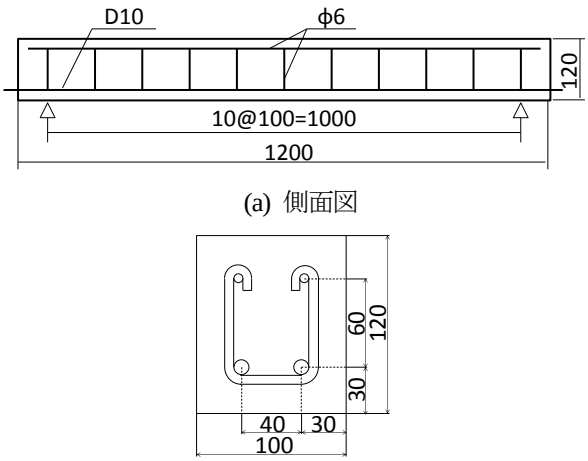
2.1 RC 梁試験体の概要

RC 梁試験体の寸法および配筋を図－1 に示す．試験体は幅 100mm，高さ 120mm の複鉄筋矩形断面を有する長さ 1200mm の RC 梁である．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(SR295)を使用した．引張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．せん断余裕度は 2.46 であり，曲げ破壊が先行するように断面設計を行った．なお，試験体は全て同じ材料で同時に作製し，JIS に基づき測定したコンクリートの圧縮強度と静弾性係数はそれぞれ 30.2MPa と 28.7GPa である．

後述する電食法によって引張鉄筋の腐食レベルにより試験体を区分すると表－1 の通りである．腐食レベルは予想腐食率によって 3 段階（腐食無しを含む）に区分した．なお，試験体名において，S は静的載荷試験，I は衝撃載荷試験を表し，ハイフン以後の N は腐食無し，L○は鉄筋腐食による劣化試験体（○は腐食レベル）を表す．腐食レベルが同一の試験体は，電食試験における積算電流量が等しいことを表している．

2.2 電食法による促進劣化試験の概要

本研究では劣化試験体の作製手法として，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る電食法を採用した [3]．また，電食法では自然暴露等と比較して一様腐食を実現するのに適していると言われている．電食試験の概要を図－2 に示す．図のように直流電源装置の陽極と供試体の引張鉄筋，陰極と銅板をそれぞれリード線で接続し，3%NaCl 溶液の入った水槽に浸漬させ，500mA の電流により通電した．また，鉄筋の張り出し部においては，局所的な腐食を避けるためエポキシ樹脂によりコーティングを行った．通電時間については事前に実施した電食試験の結果に基づき，目標腐食率に応じて設定した．なお，引張鉄筋のみを腐食させる目的で，引張鉄筋とせん断補強筋間にはブチルゴムによる絶縁処理を図った．



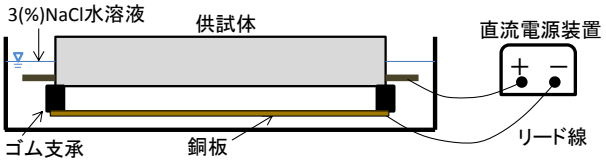
(a) 側面図

(b) 断面図

図－1 RC 梁試験体の寸法および配筋図（単位：mm）

表－1 試験体区分および実腐食率

試験体名	腐食レベル	予想腐食率 (%)	実腐食率 (%)
S-N	腐食無し	－	－
S-L1	レベル 1	5.00	6.13
S-L2	レベル 2	10.00	11.71
I-N	腐食無し	－	－
I-L1	レベル 1	5.00	7.03
I-L2	レベル 2	10.00	11.04



図－2 電食法による促進劣化試験の概要図

2.3 劣化程度の詳細調査

(1) 実腐食率

引張鉄筋の実腐食率を測定するために，全載荷試験終了後にコンクリートをはつり，引張鉄筋を取り出した．その後，採取した引張鉄筋をスパン長（1000mm）で切断し，10(%)クエン酸二アンモニウム溶液に 72 時間浸漬することで腐食生成物を除去した．除錆後はたわしで付着している腐食生成物を洗い落とし，十分に乾燥させた後，引張鉄筋質量を測定することで腐食率 w を算出した．ここで，腐食率は鉄筋の質量減少率であり，式(1)によって算出した．

$$w = \frac{m_0 - m_c}{m_0} \times 100 \qquad (1)$$

ここで，m_0 は腐食前の鉄筋の質量，m_c は腐食後の鉄筋の質量である．

各供試体の実腐食率を表－1 に示す．この表より，電

食法により，実腐食率は目標の予想腐食率を概ね達成できたことが確認できる．次に，除錆後の引張鉄筋の腐食性状を写真－1 に示す．なお，同一腐食レベルにおいて同様な腐食性状を示していたことから，写真－1 には静的載荷試験用の試験体における腐食性状を示している．これらの写真より，腐食率 6%程度の腐食レベル 1 においては鉄筋の節が腐食により滑らかな形状になっていることが確認できる一方で，腐食率 10%以上のレベル 2 においては，鉄筋断面の減肉により断面積が明らかに減少し，位置的な若干のばらつきを確認することができる．また，2.2 節において引張鉄筋とせん断補強筋の間で絶縁処理を図ったと記載しているが，実際の腐食状況としてはいくつかの供試体においてせん断補強筋下部に若干の腐食と，それに伴うせん断補強筋に沿ったひび割れが確認できた．このひび割れは衝撃試験においてかぶりコンクリートの剥落などの破壊性状に影響を及ぼす可能性があるが，耐荷力や各応答値に及ぼす影響は小さいものと考えられる．

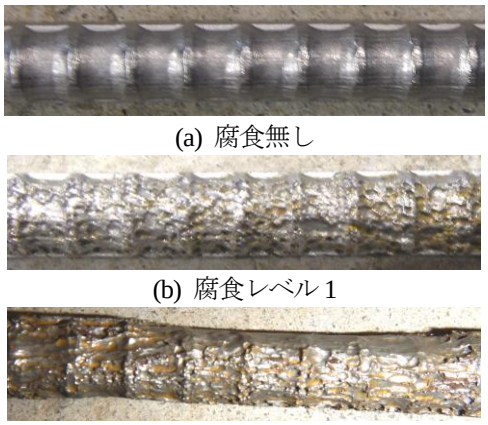
(2) 目視による腐食ひび割れ

電食試験終了後の腐食ひび割れ状況のスケッチを図－3 に示す．これらの図では，ひび割れ幅 0.1mm 以上のひび割れを朱書きの線で記している．なお，同一腐食レベルにおいて同様な腐食ひび割れ状況を示していたことから，図－3 には静的載荷試験用の試験体における腐食ひび割れ状況を示している．これらの図より，腐食によるひび割れは底面および側面に引張鉄筋方向の全スパンに渡り生じていることが確認でき，その最大ひび割れ幅はそれぞれ 0.5mm と 0.7mm 程度に達していた．これらのひび割れからは錆汁の発生も確認できた．なお，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．

3. 鉄筋腐食した RC 梁の静的載荷時の基本特性

3.1 既往の研究から得られた知見

鉄筋腐食した RC 梁部材の曲げ耐荷性能に関する研究の現状把握，ならびに本研究で作成した落錘衝撃試験に用いる劣化試験体が静的載荷時において既往の研究と大きな差異が無いことを確認する目的で，まずは，数多く公表されている既往の研究[1)~11)]により，鉄筋腐食した RC 梁の基本特性について整理した．整理方法としては，既に公表されている論文の中で，実験値が明確に記載されているものを対象に，鉄筋腐食率と曲げ耐力比（健全

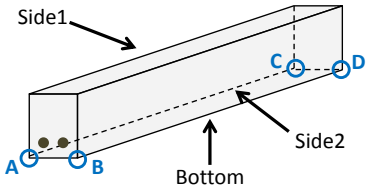


(a) 腐食無し

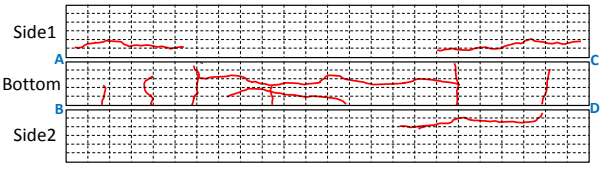
(b) 腐食レベル 1

(c) 腐食レベル 2

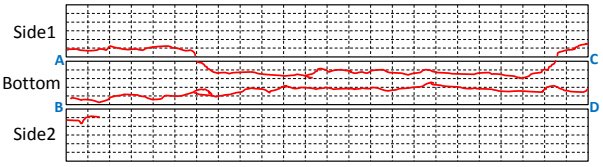
写真－1　除錆後の鉄筋の状況



腐食ひび割れ状況を確認した面

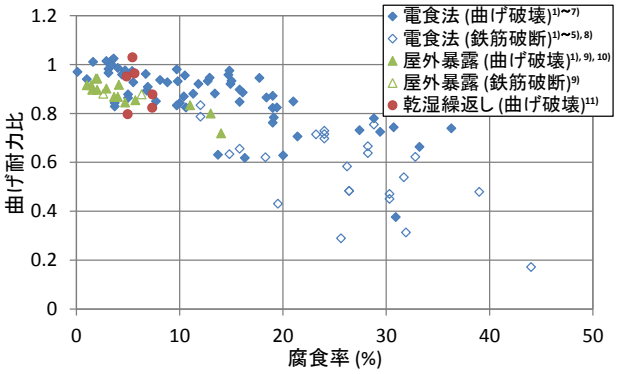


(a) 腐食レベル 1



(b) 腐食レベル 2

図－3　腐食ひび割れ状況



図－4　既往の研究による腐食率と曲げ耐力比の関係

供試体に対する腐食供試体の最大荷重比）の関係に着目し，促進劣化方法と最終的な破壊形態がわかるように整理した．その結果を図－4 に示す．この図より，促進劣

化方法や供試体寸法などの諸条件に関わらず腐食率が増加するにつれて曲げ耐力比は減少する傾向にあり，腐食率 10%程度までは曲げ耐力比 0.8 を有し，それ以降は非常にばらつきが大きくなるが，腐食率 20%を超えると鉄筋破断に至るケースが急増することが確認できた．以上を踏まえて，本研究で実現した最大実腐食率約 11%に対する曲げ耐力比は 0.8 以上であることが推察でき，この値を本研究で製作した試験体における静的載荷試験の結果の目安とした．

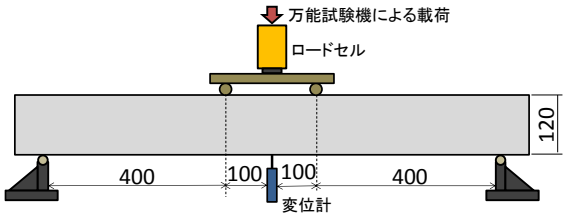
3.2　実験概要

まず，電食試験により促進劣化させた RC 梁試験体の曲げ耐荷性能を確認するために，静的載荷試験を実施した．載荷試験は万能試験機を用い，スパン 1000mm，等曲げモーメント区間 200mm の 2 点載荷とした．載荷速度は 0.5mm/min の変位制御とし，荷重の低下を確認するまで載荷を続けた．なお，試験体は図−5 に示すように回転を許容した治具により支持し，測定項目は荷重と試験体のスパン中央の鉛直変位とし，ロードセルおよび高感度変位計を用いて測定した．また，鉄筋腐食によって RC 梁試験体に生じる劣化は，コンクリート母材の強度低下はほとんど生じず，それよりも鉄筋の断面積減少に伴う伸び能力低下や鉄筋とコンクリート間の付着劣化が支配的である．そこで，本研究では，腐食率と付着強度の関係を明らかにする目的で，RC 梁試験体と同様に電食法により促進劣化させた試験体を作製し，引き抜き試験を実施した．引き抜き試験の概要図を図−6 に示す．試験体寸法は図に示す通りで，自由端側の鉄筋突出長さは 5mm とした．試験は油圧ジャッキを用いて行い，球座を介して荷重を加えた．測定項目は荷重と鉄筋自由端のすべり量とし，ロードセルおよび高感度変位計を用いて測定を行った．なお，試験体寸法および試験方法は引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案) (JSCE-G 503-2013)[14]を参考とした．

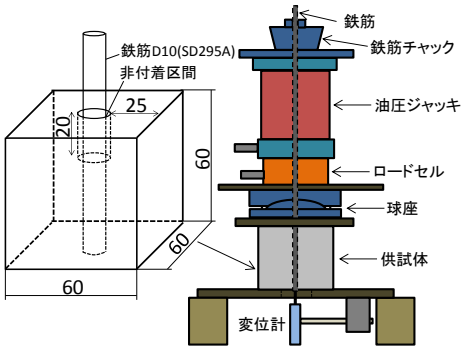
3.3　実験結果および考察

(1) 曲げ耐荷性能について

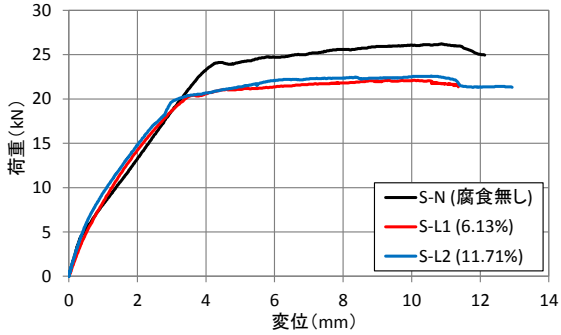
静的載荷試験の結果として，図−7 に荷重 - 変位関係，表−2 に実腐食率と最大荷重の関係をそれぞれ示す．まず，図−7 より，腐食無しの試験体の場合，荷重 5kN（変位 0.5mm）程度で曲げひび割れの発生に伴い剛性低下が生じ，その後，荷重 23kN（変位 4mm）程度で鉄筋降伏に伴う剛性低下が生じ，降伏後は変形が大きくなり，最大荷重に達した後，曲げ破壊に至るという過程を示した．一方，鉄筋腐食を有する劣化試験体の場合，曲げひび割れの発生に伴う明確な剛性低下が無く，載荷開始から非線形性を有しており，さらに，初期剛性が腐食なしの場合と比較すると若干大きくなることが確認できた．腐食率が非常に小さい場合は，既往の研究[15]でも指摘されているように，試験体表面に既に発生していた腐食ひび割れの影響や，腐食生成物により部材断面方向に作用する



図−5　静的載荷試験の概要（単位：mm）



図−6　引き抜き試験の概要（単位：mm）



図−7　荷重 - 変位関係

表−2　実腐食率と最大荷重の関係

試験体名	実腐食率 (%)	最大荷重 (kN)	最大荷重比
S-N	0	26.23	1
S-L1	6.13	22.11	0.84
S-L2	11.71	22.60	0.86

表−3　実腐食率と付着強度の関係

試験体名	実腐食率 (%)	付着強度 (N/mm^2)	付着強度比
腐食無し	0	18.1	1
C-L1-1	4.7	8.8	0.49
C-L1-2	6.7	10.0	0.55
C-L2-1	9.1	7.1	0.39
C-L2-2	11.0	7.8	0.43

膨張圧による鉄筋とコンクリート間の界面拘束力の増加によるものと解釈できるが，本実験においては供試体の個体差が原因であることも否めない．なお，破壊形態は腐食の有無や腐食レベルによらず曲げ破壊であった．

また，表－2 より，腐食によって部材耐荷力の低下を確認することができるが腐食率が異なる S-L1 と S-L2 でほぼ等しい最大荷重となっている．これは 2. 2 節でも述べたように腐食の位置的なばらつきが原因であると考えられる．なお，腐食率 12%程度で最大荷重比 0.86 となっており，図－4m データと同程度の値を示しており，既往の研究における傾向を捉えていることが確認できた．

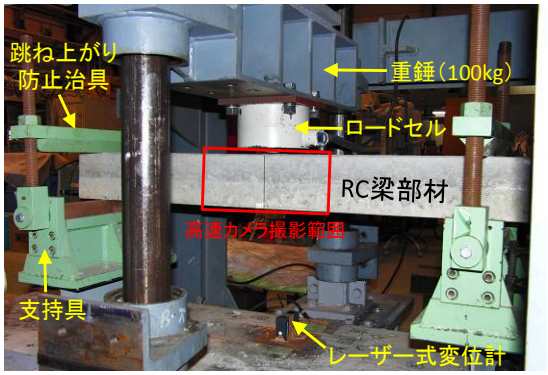
(2) 鉄筋とコンクリートの付着性能について

続いて，引き抜き試験の結果を表－3 に示す．この表より，鉄筋の腐食に伴い，鉄筋とコンクリート間の付着力が低下することが確認できるが，腐食率が 4.69~10.99%と差があるにもかかわらず付着強度比は大きく変化せず，付着強度比 0.4 程度であることがわかる．これは，引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強度試験方法(案) (JSCE-G 503-2013)[14]に従って作製したものの，試験体サイズが鉄筋径に比べて小さかったことで，腐食率 4.69%で既に腐食に伴って鉄筋方向に生じたひび割れが全断面に渡って生じ，割裂破壊が発生しやすい状況になったため，それ以上の腐食率における差異が小さかったと推察される．なお，すべての供試体で鉄筋軸方向にひび割れが発生することで割裂破壊に至り，腐食ひび割れを有している供試体に関しては，その腐食ひび割れ面で割裂破壊に至ったことを確認している．

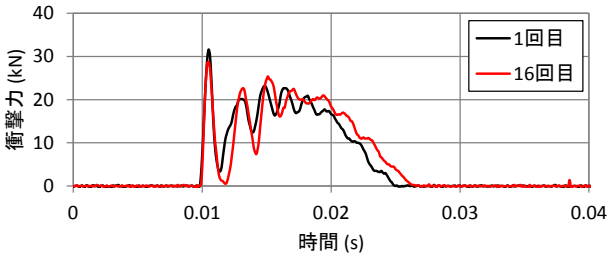
4. 落錘式衝撃試験による RC 梁の耐衝撃性能の検討

4. 1 実験概要

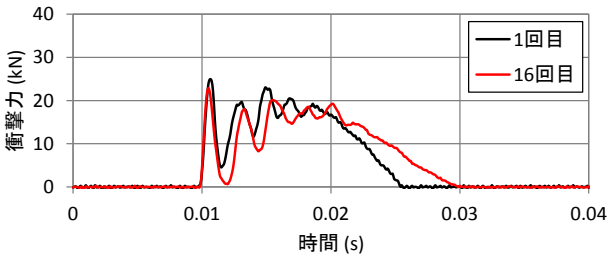
電食試験により促進劣化させた RC 梁試験体の耐衝撃性能を確認するために，落錘式衝撃試験装置を用いて重錘落下衝撃試験を実施した．写真－2 に衝撃試験装置の概要ならびに試験体設置状況を示す．本試験装置では，ガイドレールにより，自由落下挙動時や衝突時の鋼製重錘の偏心を防止できるようになっており，衝突速度と落下高さの関係は理論値どおりであることを実験開始前に確認している．載荷条件は，重錘質量 100kg の鋼製重錘を試験体スパン中央に所定の高さから自由落下させるものとし，支点は回転を許容し衝突による試験体の跳ね上がりを防止するために試験体の上下をクランプすることで固定した．衝突速度は，事前に実施した試験により最大変位が静的載荷条件下で確認された鉄筋降伏変位を超えないように 1.0m/s と設定した．なお，事前に実施した予備試験から，各応答値が正確に測定でき，安全に実験が実施できる範囲として，累積残留変位がスパンの 1%に達したときを終局とみなし，終局に至るまで繰り返し衝突することとした．測定項目は重錘衝撃力，試験体スパン中央の鉛直変位，ひび割れ発生状況とした．衝撃力は重錘側に取り付けたロードセル（容量 200kN，応答周波数 0.7kHz），変位は非接触型レーザー式変位計（応答周波数 915Hz），ひび割れ発生状況は高速度カメラ（撮影速度 1000fps）を用いて測定した．



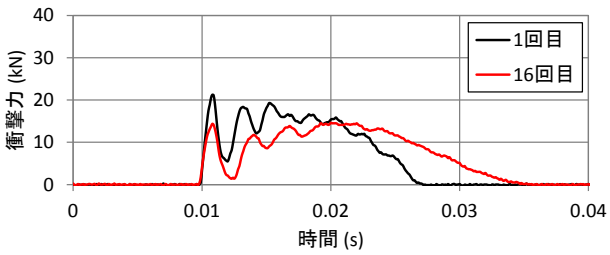
写真－2　試験装置の概要ならびに試験体設置状況



(a) 腐食無し



(b) 腐食レベル 1（I-L1）



(c) 腐食レベル 2（I-L2）

図－8　重錘衝撃力波形

4. 2 実験結果および考察

(1) 応答値の比較

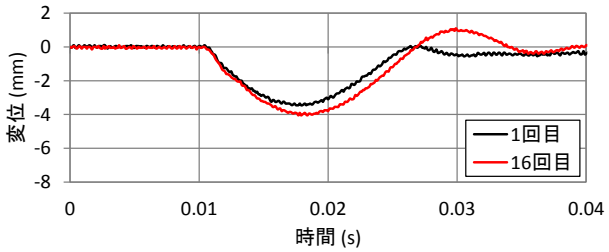
図－8 と図－9 に重錘衝撃力波形と変位波形の比較図をそれぞれ示す．腐食レベルによる同一衝突回数時の波形の違いを明らかにするために，これらの図には，衝突回数 1 回目と 16 回目のデータを代表して載せている．まず，重錘衝撃力波形はいずれのケースにおいても衝突初期に励起される継続時間 2ms 程度の三角形状の波形（第一波）と，その後，継続時間の長い台形状の波形（第二波）で構成されていることがわかる．これは重錘と梁の運動過程[16]から解釈でき，今回のケースでは，衝突速度が小さく梁が小型であったことから，第二波の台形状

の波形が大きくなったものと考えられる．ここで，1回目衝突時に着目すると，腐食レベルが大きくなるにつれて，第一波目の最大衝撃力と第二波目の台形波の平均衝撃力が小さくなり，それらの継続時間が大きくなる傾向にあることがわかった．第一波目の最大衝撃力の低下は，電食の際の絶縁処理の不完全さに起因して圧縮鉄筋側の付着劣化も生じていたためと考えられる．また，16回目衝突時をみると，腐食無しの試験体においては，最大衝撃力の若干の低下は見られるもののほぼ1回目衝突時と同様な傾向を示しているのに対し，腐食レベルが大きくなるにつれて，最大衝撃力が小さくなり，継続時間が大きくなる傾向であり，腐食レベル2に関してはその傾向は著しいことが確認できた．

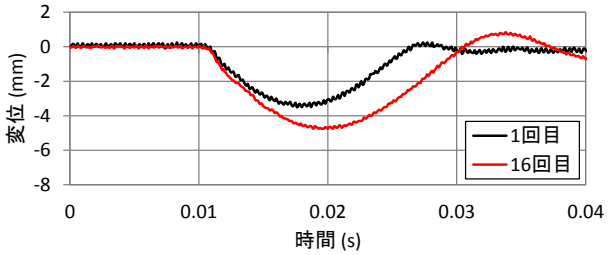
次に，図－9 より，変位波形に関しては，1 回目衝突時には，腐食レベルが大きくなると最大変位が若干大きくなる傾向にあることが確認できた．さらに，16回目衝突時には，衝撃力波形と同様に，腐食無しの試験体においては，最大変位は若干増加するもののほぼ1回目衝突時と同様な傾向を示しているのに対し，腐食レベル2に関しては，1回目衝突時の最大変位の1.8倍程度の最大変位が生じていることが確認でき，剛性低下に寄与する断面内のひび割れの進展が腐食レベルによって異なっているといえる．

(2) 累積残留変位と繰り返し衝突回数の関係

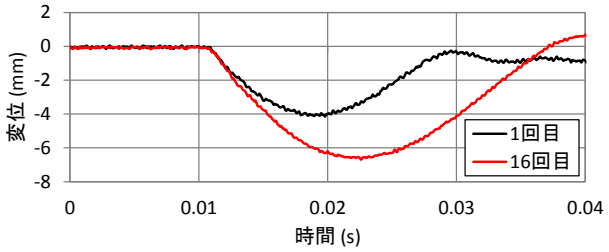
図－10 に累積残留変位と衝突回数の関係を示す．まず，腐食無しの場合，1回目衝突時で大きな残留変位を示した後，10回目衝突時に至るまで1回に生じる残留変位は徐々に小さくなり（第一段階），10 回目衝突時以降は 1 回に生じる残留変位が同程度となるためグラフは一定勾配で推移し（第二段階），また，衝突部近傍の圧縮破壊が顕著になり始める約 40 回目衝突時以降は残留変位の増加率が大きくなり（第三段階），75 回目で終局に至った．このように，累積残留変位と衝突回数の関係は 3 段階で構成される S 字曲線を有することが確認できた．一方，腐食ひび割れを有する試験体においては，このような S 字曲線は見られず，腐食レベル 1 では 10 回目衝突時までは腐食無しの試験体と同様な傾向で推移したものの，それ以降，第二段階は生じず，大きく変位が伸び始めて 32 回目で終局に至り，腐食レベル 2 では 1 回目衝突時以降から急激に，かつ直線的に変位が伸び，16回目で終局に至った．以上より，腐食を有する場合，終局破壊までのプロセスが大きく異なることが確認できた．これは，腐食ひび割れやそれによる付着劣化が影響しているものと考えられる．さらに，破壊までの繰り返し衝突回数を比較すると，腐食無しで 75 回，腐食率約7%の腐食レベル1で32回，腐食率約11%の腐食レベル2で16回となっており，腐食の影響で破壊までに許容できる入力エネルギーがかなり低下することが確認できた．静的曲げ耐力比の場合は腐食率12%で0.8～0.9程度であることを考えると，腐食により耐衝撃性は大きく低下する恐れがあり，腐食率に対するその低下率を表－4に示すように破壊までの繰り返し衝突回数で考えた場合，腐食率に対する付着力の低下率と同程度になることが確認できた．



(a) 腐食無し

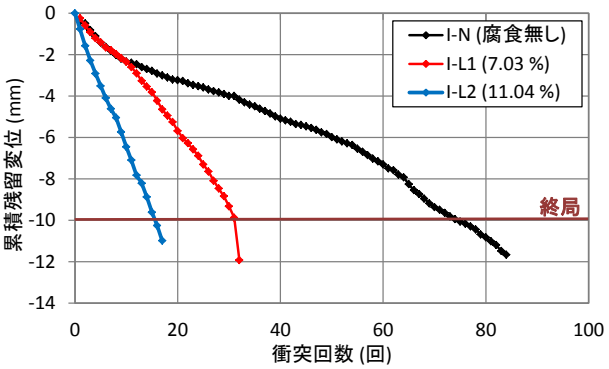


(b) 腐食レベル1（I-L1）



(c) 腐食レベル2（I-L2）

図－9　変位波形



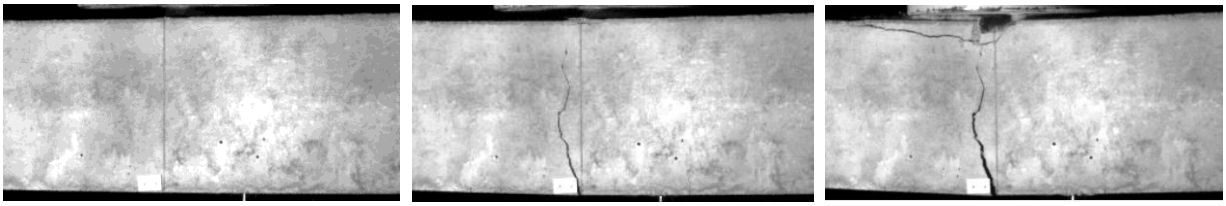
図－10　累積残留変位と衝突回数の関係

表－4　腐食率と耐衝撃性能の関係

腐食率 (%)	破壊までの衝突回数(回)	許容可能な入力エネルギー比
0	75	1
7.03	32	0.43
11.04	16	0.21

(3) 破壊性状の比較

写真－3 に破壊性状の比較写真を示す．これらの写真

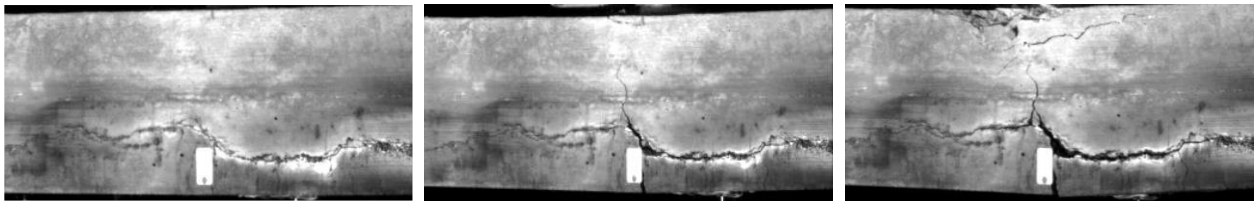


載荷前　　34 回目　　75 回目

(a) 腐食無し

載荷前　　15 回目　　32 回目

(b) 腐食レベル 1（I-L1）



載荷前　　9 回目　　16 回目

(c) 腐食レベル 2（I-L2）

写真－3　破壊性状の比較

は，重錘衝突後の最大変位発生時の写真－2 に示す領域の梁の側面状況を表しており，高速度カメラの撮影動画より静止画を取り出すことで作成した．なお，これらの写真は代表的な回数のもののみとした．まず，腐食無しの場合，1 回目衝突時に載荷点直下のスパン中央部に曲げひび割れが生じた後，回数に伴って，そのひび割れが進展していき，34 回目衝突時には圧縮縁のコンクリートの圧縮破壊が始まり，75 回目衝突時には曲げひび割れ幅が 5mm 以上となり，さらに，圧縮縁のかぶりコンクリートの完全な破壊が見られ，終局に至ったことが確認できた．次に，腐食レベル 1 の場合，3 回衝突後に曲げひび割れの発生が見られ，その後，回数に伴い，ひび割れ幅は進展するが，梁軸方向に沿って生じていた腐食ひび割れと合流し，側面から見るとT字のひび割れを形成し，15 回目衝突時に圧縮縁コンクリートの圧縮破壊が始まると，その後は，腐食ひび割れから圧縮破壊領域に縦にひび割れが進行していき，最終的に 32 回目衝突時に引張側のかぶりコンクリートの剥落がみられ，終局に至った．腐食レベル 2 においても，回数は異なるが，腐食レベル 1 と同様な傾向を示した．つまり，腐食ひび割れを有する場合，腐食無しの試験体で見られた典型的な曲げ破壊型の破壊進展だけではなく，腐食ひび割れのひび割れ方向に起因した破壊形態を示すとともに，部材軸方向に沿った腐食ひび割れと部材断面方向に生じる曲げひび割れが合流することにより，かぶりコンクリートの剥落などの危険性を高めることが確認できた．また，これは，腐食の有無に関わらず典型的な曲げ破壊型であった静的載荷時にはみられなかった現象であるといえ，鉄筋腐食した RC 梁試験体の耐衝撃性能を論じる場合は，腐食率だけではなく，腐食ひび割れの方向にも注意が必要であることがわかった．

5. 鉄筋腐食した RC 梁の耐衝撃性能に関する解析的検討

前章までに RC 梁部材の静的曲げ耐荷性能及び耐衝撃性能に及ぼす鉄筋腐食の影響について検討したが，幅広い腐食程度の影響を検討するためには実験のみでは限界があり，解析による検討も必要不可欠である．そこで，本研究では，鉄筋腐食による力学性能の低下を考慮した FEM 解析のモデル化を提案し，その解析モデルの妥当性および適用について基礎的な検討を行った．

5.1　FEM による鉄筋腐食した RC 梁のモデル化

鉄筋腐食により劣化した RC 梁を適切にモデル化するためには，鉄筋の断面積減少，鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下，腐食生成物の膨張による周辺コンクリートのひび割れといった 3 つの事象を考慮しなければならない．本研究では，その中でも耐荷性能や応答値など

の耐衝撃性に比較的大きな影響を及ぼすと考えられる鉄筋の断面積減少と付着強度の低下のみを考慮し，以下のように表現することとした．

(1) 鉄筋の断面積の減少

鉄筋腐食による断面積減少のモデル化としては解析モデルの断面積を直接的に減少させるのではなく，鉄筋の腐食率を損傷として捉え，腐食率に応じて鉄筋の力学特性を低下させ，見かけ上の断面積は初期状態と同じにすることとした．李ら[17]は鉄筋の腐食率をパラメータとして，腐食鉄筋の弾性係数および降伏強度の算出式を提案しているが，本研究では簡易的に弾性係数と降伏強度の低下率が腐食率と等しいと仮定し，式(2)および式(3)を用いて算出した．

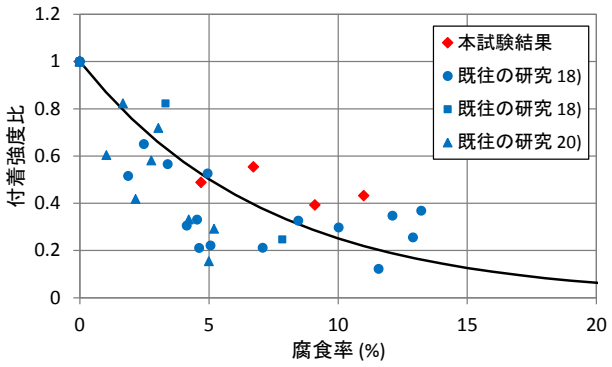
$$E' = \left(1 - \frac{w}{100}\right)E \tag{2}$$

$$\sigma'_y = \left(1 - \frac{w}{100}\right)\sigma_y \tag{3}$$

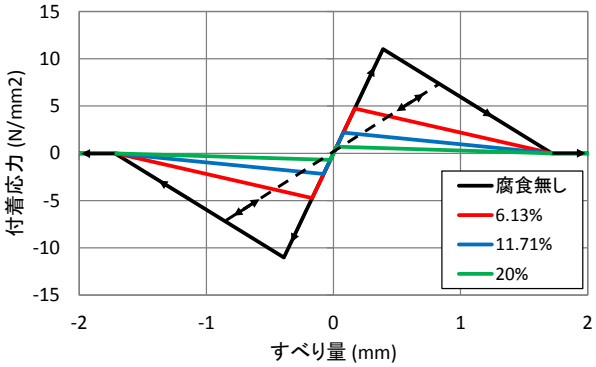
ここで，E および σ_y は健全な鉄筋の弾性係数および降伏強度，E' および σ'_y は腐食鉄筋の弾性係数および降伏強度，w は鉄筋の腐食率(%)である．

(2) 鉄筋とコンクリート間の付着強度の低下

付着特性低下のモデル化に関しては，鉄筋とコンクリートの境界に付着要素を配置することで表現することとした．具体的には，この付着要素に著者らが実施した腐食鉄筋の引き抜き試験の結果と既往の研究結果[18)~20)]から腐食率に応じて推定した付着強度と付着応力ーすべり量関係（図ー11 参照）を導入した．図ー11 (a)に示すように，腐食率に応じた付着強度に関しては，正規化された付着強度と腐食率の関係を指数近似により算出しており，実験データが存在しない腐食率 13%以上においてもこの指数近似を用いることで予測している．また，図ー11 (b)に示すように，本解析で用いる付着応力ーすべり量関係は腐食によって付着剛性は低下しないものと仮定しており，付着強度に達した後は軟化するモデルを仮定した．本モデルは，3 章で実施した引き抜き試験の結果を基にモデル化を行っているが，付着破壊後の摩擦は考慮せずに簡易的に応力をゼロまで低減させている．なお，図中の矢印は載荷・除荷・再載荷のプロセスを示している．

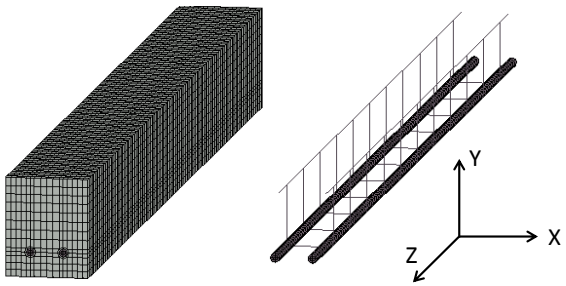


(a) 付着強度比と腐食率の関係

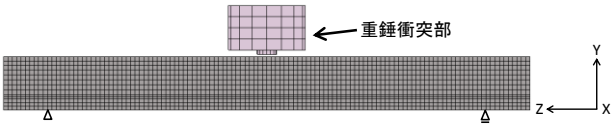


(b) 付着応力ーすべり量関係

図ー11　付着特性低下のモデル化



図ー12　RC 梁のモデル図（左：全体図，右：配筋図）



図ー13　衝撃解析のモデル図（側面図）

5.2　解析条件

(1) 解析モデルおよび材料特性

解析モデルの外観および配筋を図ー12 に示す．解析モデルの寸法は実験で用いた供試体と同様である．なお，本解析は汎用有限要素解析ソフト MSC.Marc を使用した．コンクリートおよび引張鉄筋は 8 節点を有する 3 次元ソリッド要素，せん断補強筋および圧縮鉄筋は 2 節点トラス要素，鉄筋とコンクリートの界面には上述の通り付着要素を用いている．要素寸法は断面内においてコンクリートで 1 辺 10mm，引張鉄筋で 1 辺 3mm を目安に分割しており，梁の軸方向にはすべての要素で 10mm ごとに分割している．なお，実験においても定着鋼板等は使用していないため鉄筋の抜け出しを許容したモデルとなっている．また，静的曲げ解析においては実験時の荷重点に強制変位（12mm）を漸増で与えることとし，衝撃解析においては図ー13 に示すように重錘をモデル化し，その重錘に重力加速度を与え，衝突速度 1m/s となる衝突現象を陰解法であるシングルステップフーボルト法によ

り時刻歴に解くこととした．なお，重錘とコンクリートの衝突部における摩擦は考慮していない．

本解析で入力した材料特性および構成則を表－5 および図－14 に示す．図－14 に示すようにコンクリートは圧縮側で完全弾塑性，引張側は引張強度に達すると線形軟化する構成則とした．軟化勾配 E_S に関しては破壊エネルギーの等価性を仮定し，Bazant らの式[21]を用いて要素寸法依存性を低減させた．Bazant らの式を式(4)に，破壊エネルギーおよび要素等価長さの算出式を式(5)，式(6)に示す．

$$E_S = \left(\frac{1}{E} - \frac{2G_f}{f_t^2 h} \right)^{-1} \tag{4}$$

$$G_f = \frac{1}{100} \left(d_{max} \right)^{\frac{1}{3}} f'^{\frac{1}{3}}_{ck} \quad (N/mm) \tag{5}$$

$$h = \sqrt[3]{V} \tag{6}$$

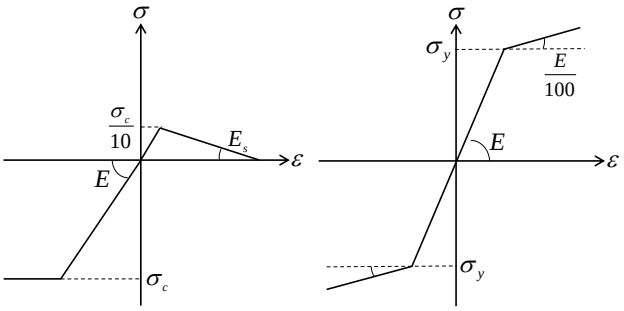
ここで，f_t はコンクリートの引張強度(本解析では圧縮強度の 1/10)，d_{max} は粗骨材の最大寸法(20 mm)，f'_{ck} はコンクリートの設計基準強度，V は要素の体積である．鉄筋の構成則に関しては，図－14 に示すようなバイリニア型の応力－ひずみ関係を仮定し，硬化係数は 1/100 とした．また，コンクリートにおいては非線形型の Dracker-prager の降伏条件，鉄筋においては von Mises の降伏条件に従うこととした．なお，重錘が衝突した際に RC 梁には局所的に大きなひずみ速度が生じるものと考えられるが，本解析においては材料のひずみ速度効果は考慮していない．

(2) 解析ケース

まず，腐食無し，実験で得られた腐食率（約 11%），さらに実験では実施してない比較的大きな腐食率 (20%) を設定して，解析モデルの妥当性と腐食程度による影響を検討した．さらに，実験においてはできる限り一様腐食を目指して促進劣化させたが，やはり位置的には多少のばらつきが生じていたと考えられるため，腐食の位置的なばらつきを考慮しない一様腐食モデルと，ばらつきを考慮したランダムモデルを設定し，腐食のばらつきの影響についても検討した．ランダムモデルに関しては，鉄筋の腐食率がベータ分布に従うと仮定し，腐食率の取り得る範囲は平均腐食率 μ から標準偏差 S の 2 倍までとした(μ-2S≦w≦μ+2S)．岡崎ら[22]は電食により腐食させた鉄筋の腐食量を鉄筋軸方向に 50mm 間隔で測定し，腐食量の平均値が大きくなっても軸方向分布の非一様性の程度はほぼ一定であることを示しており，その変動係数は0.34になることを報告している．本研究においては，鉄筋の腐食分布を測定していないため，この変動係数を用いて標準偏差を算出することとした．図－15 に平均腐食率 11.71%のランダム分布を示す．ランダムモデルにおいては図－15 に示すようなランダムな腐食率から鉄筋の力学特性の低下および付着特性の低下を算出し，鉄筋の要素ごとにそれらの特性を入力している．

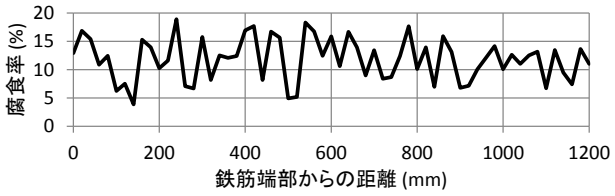
表－5　材料特性

材料	弾性係数 (GPa)	ポアソン比	σ_c, σ_y (MPa)
コンクリート	28.7	0.2	30.2
鉄筋	200	0.3	340

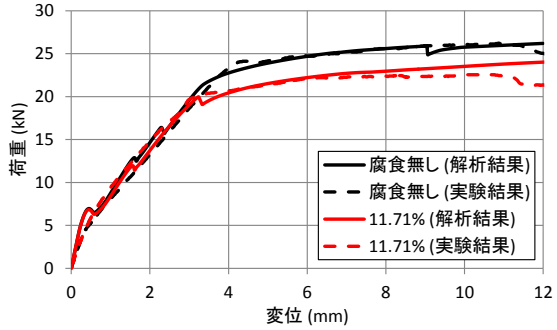


(a)　コンクリート　　(b)　鉄筋

図－14　応力－ひずみ関係（単軸換算）



図－15　ランダム分布（平均腐食率 11.71%の場合）



図－16　荷重-変位関係（実験結果と解析結果の比較）

5.3　静的曲げ解析結果および考察

(1) 荷重-変位関係の比較

図－16 に腐食無しと一様腐食モデルにおける 11.71%の解析結果を実験結果と併せて示す．解析結果より，付着要素を配置したことにより鉄筋降伏以前において荷重の急激な低下がいくつか見られるものの，鉄筋腐食による最大荷重の低下を再現できていることが確認できた．また，解析結果は実験結果を精度よく再現しており，提案した簡易なモデル化が静的荷重下では適用可能であることが確認できた．

図－17 には，腐食無し，一様腐食モデルにおける 11.71%，20%の解析結果およびランダムモデルにおける

腐食率 11.71%の解析結果を示している．腐食率 11.71%の解析結果より，腐食分布をランダムにした場合，一様腐食モデルに比べて最大荷重が若干低下するものの，その挙動に大きな差は見られない．よって，腐食率が 11%程度以下であれば簡易的に一様腐食モデルを仮定しても耐荷性能を評価することができると考えられる．また，腐食率 20%の最大荷重においては，腐食無しにおける最大荷重の半分程度となっており，その後荷重が低下していることも確認できた．これは，鉄筋とコンクリート間の付着強度低下が大きな原因であると考えられ，次項において詳しく考察する．

(2) ひび割れ分布性状の比較

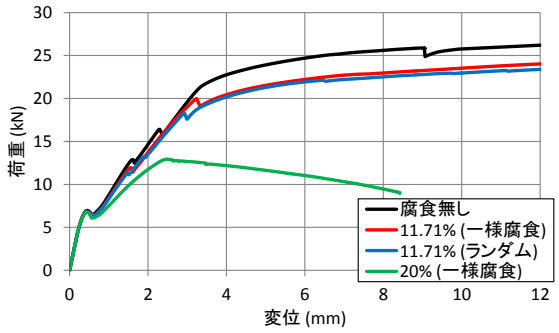
図－18 は梁中央の変位が 10mm に達した時のひび割れ分布性状を示している．図に示すコンターはひび割れ判定を受けた要素における相当ひずみの分布であり，グラフは引張鉄筋下部における付着要素のすべり量を示している．また，赤線はその腐食率において付着応力が最大となるすべり量，青線は付着応力がゼロとなるすべり量を表しており，z 軸に正の方向のすべり量は正のすべり量であり，z 軸に負の方向のすべり量は負のすべり量である．

まず，ひび割れ分布性状を比較すると既往の研究 [2), 9)] でも報告されているように，腐食率の増加に伴ってひび割れの分散性が低下していることが確認できる．この差は付着要素のすべり量にも表れており，ひび割れが分散している腐食無しのケースにおけるすべり量は梁全長にわたって付着強度を超えていないが，分散性が低下している腐食率 11.71%のすべり量は梁中央で付着強度を超えている要素も確認することができる．また，ひび割れ発生個所ですべり量が大きくなる傾向も確認でき，付着特性がひび割れ分散性に大きな影響を与えていることが確認できる．ひび割れのプロセスとしては，どのケースにおいても，まず，載荷点下部の 2 箇所でひび割れが発生し，その後，梁中央，せん断スパン部とひび割れが分布するのが確認できた．しかし，腐食率 20%のケースにおいては載荷点下部の 2 箇所でひび割れが発生した後，付着強度の低下によってせん断スパン部が左右にすべり，載荷点下部のひび割れが進展していくことで破壊に至った．つまり，梁はほぼ角折れに近い状態で破壊が進行し，ひび割れ箇所の鉄筋とその上部のコンクリートのみで荷重に抵抗していたと考えられ，これが急激な最大荷重の低下につながったものと考えられる．

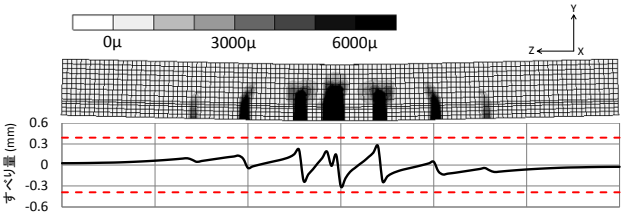
5.4 衝撃解析結果および考察

(1) 応答値の比較

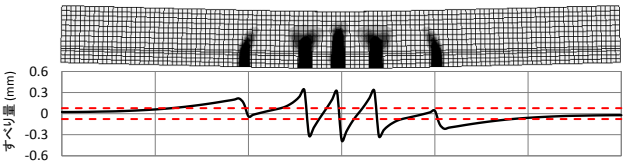
図－19 および図－20 に腐食無しおよび一様腐食モデルにおける 11.04%の衝撃力応答と変位応答を実験結果と併せて示す．衝撃力応答は解析においても継続時間の短い三角形上の第一波と継続時間の長い台形状の第二波で構成されていることが確認できた．また，腐食無し



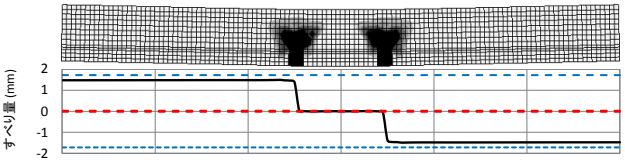
図－17　ランダム分布および腐食率 20%の影響



(a) 腐食無し

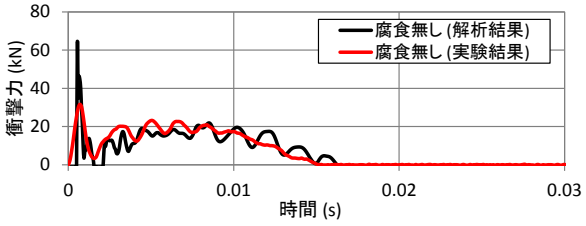


(b) 腐食率 11.71%（一様腐食）

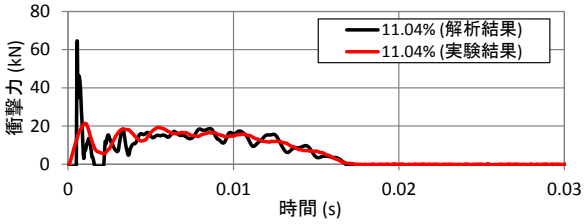


(c) 腐食率 20%（一様腐食）

図－18　静的曲げ解析におけるひび割れ分布性状



(a) 腐食無し



(b) 腐食率 11.71%

図－19　衝撃力応答（実験結果と解析結果の比較）

と 11.04%の解析結果を比較すると，わずかではあるが腐食によって第二波の衝撃力が減少し，その継続時間が増

加しており，変位応答に関しても腐食によって最大変位が増加していることが確認できた．さらに，解析結果は実験で得られた応答値の形状や継続時間を概ね再現できており，提案したモデルを用いることによって，実験で確認された腐食による応答値の変化を定性的に再現できることが確認できた．しかし，最大衝撃力や最大変位，さらに最大変位以降の自由振動においては差異がみられたため，定量的な評価をしていくためには減衰や材料のひずみ速度効果などを考慮し，さらに繰り返し衝撃実験時の最終破壊状態を再現するためには腐食ひび割れの不連続性も劣化モデル化に考慮する必要があると考えられるが，それについては今後の課題である．

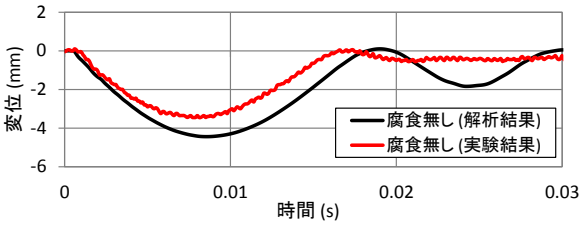
図－21 には腐食無し，一様腐食モデルにおける 11.04%，20%の変位応答およびランダムモデルにおける腐食率 11.71%の変位応答を示している．腐食率 11.04%の変位応答より，腐食分布をランダムにした場合は一様腐食モデルに比べて最大変位が若干増加するが，その挙動に大きな差は見られない．これは静的曲げ解析と同様の傾向を示しており，衝撃荷重下においても腐食率が 11%程度以下と比較的低い場合であれば簡易的に一様腐食モデルを仮定しても耐荷性能を評価することができると考えられる．腐食率 20%の変位応答においても静的曲げ解析と同様の傾向を示しており，付着強度の低下によって最大変位が腐食無しにおける最大変位の 2 倍程度となり，腐食率が低い場合とはその挙動が大きく異なることが確認できる．

(2) ひび割れ分布性状の比較

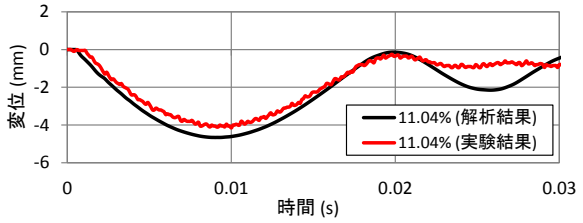
図－22 には，衝撃解析において変位応答が最大の時のひび割れ分布性状を示している．なお，コンターやグラフの見方に関しては 5. 3 節と同様である．腐食無しと 11.04%のひび割れ分布を比較すると，衝撃解析においては静的曲げ解析で確認出来たようなひび割れ分散性の低下は確認できないことがわかる．これは，すべり量のグラフからもわかるように，腐食率 11.04%のように付着強度が低下しても，衝突速度 1m/s 程度では付着強度を超える要素が少ないため分散性に差異が表れなかったものと考えられる．一方で，腐食率 20%まで付着強度が低下すると，衝突部下部においてひび割れが発生した後，ヒンジ支点側のすべり量のみが増加し，ローラー支点側は大きく滑るような挙動が確認出来た．このような大きく滑る挙動が原因で腐食率 20%における最大変位が急激に増加したと考えられる．

6. まとめ

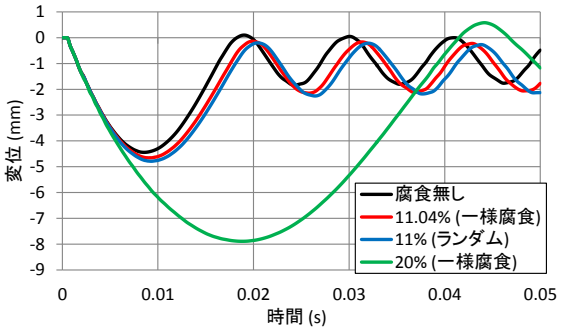
本研究では，鉄筋腐食した RC 梁の耐衝撃性能に関する知見不足という現状を踏まえて，促進劣化法の一つである電食法によって鉄筋腐食させた RC 梁試験体を製作し，静的曲げ耐荷性能と耐衝撃性能について，腐食率に着目して実験的検討を実施し，さらに，鉄筋腐食による力学性能の低下を考慮した FEM 解析による基礎的な検討を行った．本研究で得られた成果を以下に列挙する．



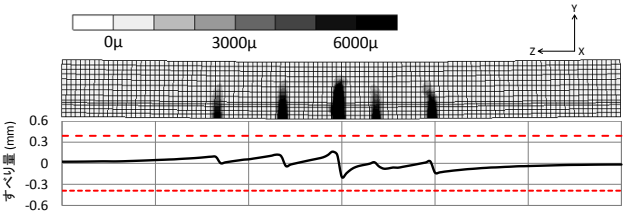
(a) 腐食無し



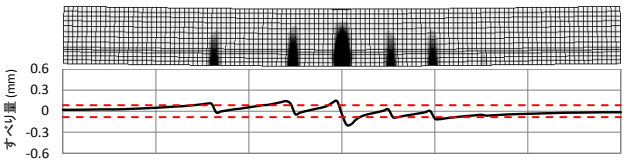
(b) 腐食率 11.71%



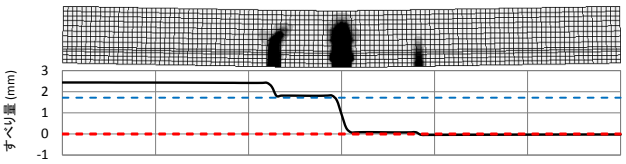
図－21　ランダム分布および腐食率 20%の影響



(a) 腐食無し



(b) 腐食率 11.04%（一様腐食）



(c) 腐食率 20%（一様腐食）

図－22　衝撃解析におけるひび割れ分布性状

図－20　変位応答（実験結果と解析結果の比較）

1) 鉄筋腐食により劣化したRC梁試験体の耐衝撃性能として，単発衝撃時の重錘衝撃力波形と変位波形を比較したところ，腐食レベルが大きくなるにつれて，最大衝撃力が小さく最大変位が大きくなり，部材としての曲げ剛性が若干低下することが確認できたが，それ以上に繰り返し衝撃に対する性能低下が顕著であった．
2) 破壊までの繰り返し回数は，腐食無しに比べて，腐食率約 7%の場合に約 4 割に，腐食率 10%の場合に約 2 割にまで低下し，腐食により許容可能な入力エネルギーが大幅に低下することが確認できた．静的曲げ耐力比の場合は腐食率約 12%で 0.8～0.9 程度であることを考えると，腐食により耐衝撃性は大きく低下する恐れがあることを明らかにした．また，腐食率による許容可能な入力エネルギーの低下割合は，付着強度比と同程度であることがわかった．
3) 腐食ひび割れを有する場合，腐食ひび割れの方向に起因した破壊形態を示すとともに，部材軸方向に沿った腐食ひび割れと部材断面方向に生じる曲げひび割れが合流することにより，かぶりコンクリートの剥落などの危険性を高めることが確認できた．また，腐食の有無に関わらず典型的な曲げ破壊型であった静的載荷時とは明らかに異なる傾向を示したため，鉄筋腐食した RC 梁試験体の耐衝撃性能を論じる場合は，腐食率だけではなく，腐食ひび割れの方向にも注意が必要であることがわかった．
4) 鉄筋腐食による劣化を鉄筋の断面積の減少と鉄筋とコンクリート間の付着特性の低下と捉え，実験結果に基づく付着強度や付着応力ーすべり関係を用いることで，FEM 解析によって RC 梁の静的曲げ耐荷性能を精度良く再現できることが確認でき，腐食による応答値の変化を定性的に再現できることから衝撃解析にも適用可能であることが確認できた．さらに，解析によって，腐食率の増加に伴うひび割れ分散性の低下や腐食程度が大きい場合の耐荷性能の急激な低下を付着劣化の観点から明らかにした．

今後，FEM 解析により定量的な評価をしていくためには材料のひずみ速度効果などを考慮し，さらに繰り返し衝撃実験時の最終破壊状態を再現するためには腐食ひび割れの不連続性もモデル化に考慮する必要があるといえる．

参考文献

1) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集 E, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006
2) 村上祐貴，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食した RC 梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究，土木学会論文集 E，Vol.64，No.4，pp.631-649，2008
3) 黒田一郎，村上将也，山本佳士，古屋信明：鉄筋腐食させた RC 梁の非破壊検査に基づく残存曲げ耐力算定に関する基礎的研究，構造工学論文集 Vol.55A，pp.833-841，2009
4) 松下綾太，高橋良輔，斉藤成彦：鉄筋腐食した RC はりの曲げ変形性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，pp.1483-1488,2010
5) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ 85，2009
6) 村上祐貴，董衛，大下英吉，鈴木修一，堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はり部材の耐荷性状評価，土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.605-624, 2011
7) 村上祐貴，山内佑樹，堤知明，大下英吉：鉄筋腐食した RC 梁部材の残存曲げ耐力に及ぼすせん断補強筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.727-732，2006
8) 村上祐貴，木下哲秀，鈴木修一，福本幸成，大下英吉：鉄筋腐食を生じた RC 梁部材の残存曲げ耐力性状に関する研究，コンクリート工学論文集第17巻第1号，pp.61-74，2006
9) 倉知星人，佐藤孝史，小林孝一，六郷恵哲：塩害による鉄筋の性能低下が RC はり部材の耐荷性能に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.819-824，2008
10) 山住克巳，宮本征夫，佐藤勉：鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について，コンクリート工学年次論文報告集，12-1，pp.557-562，1990
11) 松田耕作，横田優，荻山和樹，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリートはりの耐荷性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.809-812，2008
12) 小林孝一：塩害により劣化した RC 部材の耐震性に関する研究，コンクリート工学論文集第 16 巻第 2 号，pp.50-59，2005
13) 長嶺希，山川哲雄：沖縄で自然暴露のより損傷した RC 柱の正負繰り返し水平加力実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.2，pp.889-894，1998
14) 土木学会：コンクリート標準示方書［規準編］土木学会規準および関連規準，pp.331-334，2013
15) 松田耕作，横田優，米澤和宏，松島学：塩害劣化を受ける鉄筋コンクリート梁の耐荷性能に関する実験的研究，構造工学論文集 Vol.58A，pp.834-843，2012
16) 岩波光保，白根勇二，横田弘：繰返し衝撃荷重を受ける鉄筋コンクリートはりの破壊性状，港湾技術研究所資料，No.1152，2007
17) 李翰承，友澤史紀，野口貴文，鹿毛忠継：有限要素法による鉄筋の腐食した RC 梁の耐力性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.19, No.1, pp.1147-1152,

1997
18)齋藤祐哉，大屋戸理明，金久保利之：鉄筋が腐食したRC部材の局所付着性状に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.691-696，2008
19)阿部哲雄，番場俊介，村上祐貴：鉄筋が腐食したRC部材の付着応力性状に及ぼす横補強筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1282-1287，2014
20)長岡和真，阿部哲雄，番場俊介，村上祐貴：主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価，コンクリート工学論文集第24巻第2号，pp.29-42，2013
21)Bazant Z. P. ，Oh B. H. ：Crack band theory for fracture of concrete，Materials and Structures 16 ，pp.155-177，1983
22)岡崎雅弘，下村匠，松尾洋：鉄筋軸方向の非一様性に着目したコンクリート中の鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.857-862，2003

（2016年9月26日受付）
（2017年2月1日受理）