

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 11 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25820210

研究課題名(和文)劣化したRC構造物の構造性能低下に及ぼす载荷速度依存性の解明と性能評価法の提案

研究課題名(英文)Clarification of the effect of loading rate dependency on the performance of deteriorated RC structures and development of its evaluation method

研究代表者

玉井 宏樹(TAMAI, HIROKI)

九州大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：20509632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、まず、鉄筋腐食により材料劣化したRC部材の静的载荷と衝撃载荷の両実験を通して、衝撃载荷の場合は、腐食レベルが小さい場合でもかぶりコンクリートの剥落の可能性が大きくなるなど、構造性能低下に及ぼす载荷速度依存性を解明した。また、実験により付着力の低下率を明らかにし、それを考慮したFEM解析手法を構築した。さらに、打音検査を実施し、実際の劣化状況・非破壊検査出力値・残存性能の3者の関係の把握を試みたが、打音検査では鉄筋腐食による程度を定量的に評価できず、3者を関係付けることができなかった。今後、逆問題の知識を援用することで3者の関係付けを試みたい。

研究成果の概要(英文)：In this study, at first, to make clear the influence of loading rate dependency on the residual performance of corroded RC member, corroded RC members were made by using electrolytic corrosion method, and both of static loading test and repeated impact test. As a result, through repeated impact tests, the number of impacts to failure of corroded RC beams were less than half of healthy RC beams. In addition, it is found that fracture pattern is completely different due to some axial cracks. Next, to make clear a triadic relationship between (a) real damage state, (b) output value of NDT and (c) residual performance of corroded RC member, hammering tests were also conducted. As a result, it is found that to make a correlation between (a), (b) and (c) is hard because the output value such as sound pressure and frequency is not sufficient to estimate the corrosion level. In addition, FE modeling for corroded RC member was developed in consideration of degradation of adhesion.

研究分野：工学

キーワード：鉄筋腐食 材料劣化 RC部材 耐荷性能 衝撃荷重 非破壊検査

1. 研究開始当初の背景

(1)我が国の社会資本は、戦後の高度経済成長とともに着実に整備されてきたが、今後、こうした社会資本の高齢化が急速に進行するという課題に直面することになる。国土交通白書(平成23年)によると、建設後50年以上経過する社会資本の割合を現在と20年後で比較すると、例えば、港湾岸壁では約5%から53%と急増することがわかっている。つまり、予防保全(点検・診断)から事後的処置(補修・補強)の一貫性を有した維持管理技術を確立することが急務であると考えられる。

(2)港湾構造物などの鉄筋コンクリート構造物の維持管理に関する研究は様々実施されてきているが、点検・診断による出力値から構造性能の低下を定量的に評価した上で合理的な維持・補修を実施するといった一貫性を有した維持管理フローが確立されていない。その理由は、①漂流物や消波ブロックの衝突など過酷な環境下に置かれている既設港湾構造物の耐衝撃性能や残存性能が解明されていないこと、②点検・診断による出力値から構造性能低下を評価可能な手法が確立されていないこと、などが挙げられる。

(3)上述の課題を解決するためには、まず、鉄筋腐食などにより劣化したRC構造物が静的荷重と衝撃荷重の両載荷に対する破壊形態や構造性能の違いを明らかにすると同時に、残存性能を定量的に評価可能な解析手法を構築し、さらに、非破壊検査出力値のみで残存性能予測を実現するために、実際の劣化状況・非破壊検査出力値・残存性能(耐荷力)の3者の関係を明らかにすることが不可欠である。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえて、本研究課題では、材料劣化によるコンクリート構造物の静的荷重または衝撃荷重に対する構造性能低下を定量的に評価し、さらに、非破壊検査を採用し、その出力値と実際の劣化状況や残存性能の関係性を明らかにすることで、一貫性を有した維持管理技術の確立や合理的な補修・補強に資する有用なデータを提供することを最終目標とする。

3. 研究の方法

上述の目的を達成するため、次の3つの項目に対して研究を遂行した。

(1)耐衝撃性能や残存耐荷性能が実際に問題視されているRC構造物に焦点を当て、まず、静的から衝撃といった載荷速度の異なる載荷実験によって鉄筋腐食により材料劣化したRC部材の構造性能低下に及ぼす載荷速度依存性の影響を検討する。また、載荷速度一定の下、繰返し載荷(衝突)することで、RC版部材の耐繰返し衝撃性能を実験的に把握する。

(2)劣化の影響を考慮したFEモデリングを考案した上で、ひずみ速度依存性や累積損傷を考慮した高度な解析手法を構築し、それにより解析を実施することで、材料劣化の影響を考慮したRC版部材の耐荷性能評価法を提案する。

(3)非破壊検査法を援用することで、実際の劣化状況と非破壊検査出力値とRC版部材の残存性能の関係性を解明する。

4. 研究成果

(1)鉄筋腐食により材料劣化したRC部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する実験

劣化したRC構造物の構造性能低下に及ぼす載荷速度依存性を調べる基礎的検討として、鉄筋腐食により材料劣化したRC部材を対象に静的載荷実験ならびに衝撃載荷実験を実施し、残存耐荷性能や破壊形態を比較検討した。

実験に用いた供試体は幅100(mm)、高さ120(mm)、長さ1200(mm)で、スパンは1000(mm)とした。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厚は底面、側面共に25(mm)であり、せん断補強筋の配置間隔は100(mm)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。鉄筋腐食方法としては、電食試験法を用いることとし、直流電源装置を用いて、3(%NaCl溶液)に浸漬したRCはりの引張鉄筋に電流を印加する方法を採用した。印加電流密度は引張鉄筋表面積に対して0.0028(A/cm²)とし、鉄筋の腐食程度は通電時間により制御することとした。また、載荷試験後に、供試体をはつり、鉄筋の腐食率を測定した。電食試験後の供試体一例を図-1に示すが、腐食生成物の発生に伴う体積膨張により、引張鉄筋軸方向にひび割れが生じていることが確認できた。



(a)腐食レベル2(底面)



(b)腐食レベル3(底面)

図-1 電食試験後の供試体のひび割れ状況

まず、曲げ耐荷性能を把握する目的で静的載荷試験を実施した。本試験では、万能試験装置を使用し、測定項目は荷重および供試体中央の変位とした。載荷条件は等曲げモーメント区間200(mm)の2点載荷とし、載荷速度は0.5(mm/min)とした。静的載荷試験の結果

を図-1に示す。図より、すべての供試体においてスパン中央の変位が3~4(mm)に達すると鉄筋降伏に伴い剛性が低下し、荷重が最大値に達した後は徐々に荷重が低下するという挙動を示した。なお、破壊形式は全ての供試体で曲げ引張破壊となった。また、表-1よりS-L2(腐食率 0.94%)までの供試体は最大荷重が上昇しているが、S-L3(腐食率 6.13%)以降では最大荷重が急激に低下することが確認できた。これは、腐食率が小さい範囲では鉄筋の発錆による断面積減少の影響よりも、鉄筋が腐食により膨張することで鉄筋と周辺コンクリート間が密実になる影響が支配的となり、腐食率が大きくなると鉄筋の発錆による断面積の減少の影響やそれに伴う付着力の低下が支配的となるためであると考えられる。次に、耐衝撃性能を把握する目的で無損傷および、鉄筋腐食供試体 D-L3(腐食率:7.03%), D-L4(腐食率:11.04%)に対し、落錘式衝撃試験を実施した。測定項目は載荷点衝撃力および供試体中央の変位とした。衝突速度は、事前に実施した試験により最大変位が静的条件下で確認された鉄筋降伏変位を超えないように1.0(m/s)とし、終局に至るまで繰り返し衝突することとした。なお、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た。まず、図-3に部材の累積残留変位と衝突回数との関係を示す。図より、D-L3では、衝突回数が10回までは鉄筋腐食が無い場合と同程度の累積残留変位を示しているが、10回以降は明らかに傾向が異なり、D-L3では累積残留変位の回数に対する進展が大きくなっていることが分かる。また、D-L4では、衝突回数1回目から明らかに傾向が異なる。終局に至る衝突回数はD-Nで75回、D-L3で32回、D-L4で16回となり、鉄筋腐食により耐衝撃性能が大きく低下することが確認できた。次に、単発衝突時については、劣化のレベルが上がるにつれて衝撃力応答が小さくなり変位応答が大きくなることがわかった。また、写真-1に終局時の破壊状況を示す。D-Nでは、まず、衝突部直下から曲げひび割れが生じ、その後、回数に伴い、そのひび割れ幅が大きくなるとともに断面全体に広がる。それに対して、D-L3やD-L4では衝突部直下からの曲げひび割れが発生すると同時に、腐食により生じていた軸方向ひび割れが回数に伴い大きくなり、破壊状況が大きく異なることが確認できた。

以上のように、静的載荷に比べ、衝撃載荷では、鉄筋腐食によるひび割れが軽微であっても、衝撃により、そのひび割れが一気に進展し、かぶりコンクリート剥落に対する安全性が低下することが確認できた。今後は様々な載荷速度に対する衝撃実験を実施していくことで、腐食程度だけではなく、腐食によるひび割れパターンと衝撃荷重載荷時の破壊形式との比較を行うことで、載荷速度依存性の定量評価を行っていくことが必要であると考えられる。

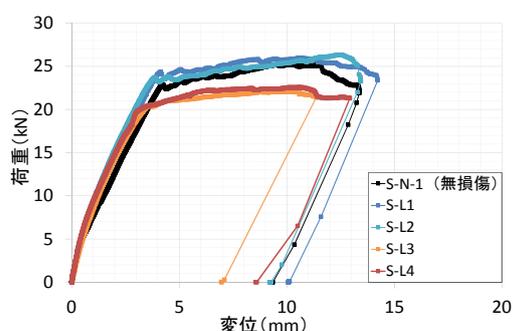


図-2 電食試験後の供試体のひび割れ状況

表-1 腐食率と最大荷重の関係

供試体	最大荷重(kN)	最大荷重比	腐食率(%)
無損傷	25.72	1	0
S-L1	25.98	1.01	0.67
S-L2	26.32	1.02	0.94
S-L3	22.11	0.86	6.13
S-L4	22.60	0.88	11.71

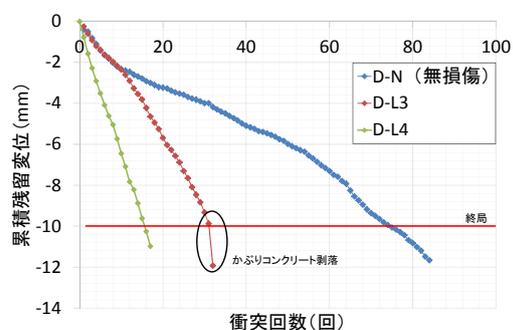
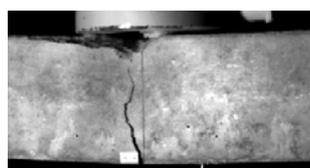
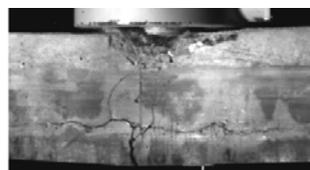


図-3 衝突回数と累積残留変位の関係



(a)無損傷



(b)腐食レベル 3

写真-1 終局時の破壊状況

(2)非破壊検査出力値と腐食程度との関係性に関する検討

実際の劣化状況と非破壊検査出力値と RC 版部材の残存性能の関係性を解明するための基礎検討として、(1)で記した実験に際して、非破壊検査法の一つである打音法を適用して、その出力値と腐食程度との関係性について検討を実施した。鉄筋の腐食に関する非(微)

破壊検査としては自然電位法や分極抵抗法などがあるが、本研究では打音法を採用した。打音法は対象とするコンクリートを打撃して得られた打撃音から、その物体の物性値や形状、欠陥の有無などを検知する方法である。測定にはFFTアナライザー、インパルスハンマー、マイクロホンを用いた。また、入力荷重と音圧の比である振幅比を比較することで、劣化程度の調査を行った。測定箇所は供試体底面の中央2か所とした。結果の一例として、振幅比と腐食率の関係を図-4に示す。図-4より腐食率の増加に伴って、振幅比が上昇する傾向にあることが分かる。振幅比は劣化の度合いが大きいほど大きくなる傾向があるため、打音法によって供試体の劣化を測定することができたと考えられる。しかし、内部に空洞を有する場合などの欠陥に比べて、健全供試体と劣化供試体の振幅比の差は非常に小さく、さらに結果にばらつきが大きいと判断される。また、今回の結果だけでは、欠陥が鉄筋腐食によるものなのか、内部の空洞によるものなのかなど、欠陥の原因を特定することはできない。以上より、打音法による出力値と腐食率の関係は明確なものが得られたとは言いがたいため、実際の劣化状況と非破壊検査出力値とRC版部材の残存性能の関係性を解明するためには、今後は他の非破壊検査法を適用するなどの追加検討が必要であると考えられる。

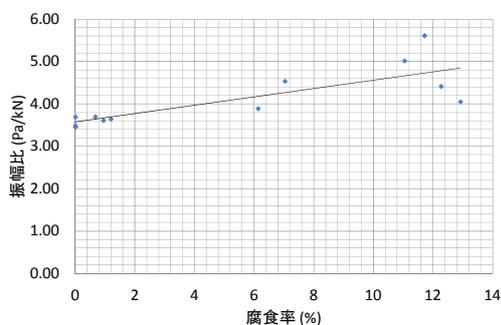


図-4 腐食程度と振幅比の関係

(3)鉄筋腐食による付着力低下を考慮したFEMによる解析手法の検討

本研究では、鉄筋コンクリートに生じるひび割れや材料自体の劣化などの損傷を统一的に評価できる数値モデリングを構築し、数値解析により劣化したRCはりの残存耐力を適切に評価することを最終目的とし、その基礎的段階として、損傷力学を用いた数値モデリングに関して検討した。具体的には、まず、コンクリートについては、ひび割れや材料劣化にともなう損傷を表現できる力学モデルを用いて異方性を有する構成則RCはりの典型的な劣化・損傷状態として鉄筋腐食にともなう耐荷性能の低下に関する解析的な検討を行った。その結果、鉄筋の腐食度に応じてRCはりの残存耐力が低下すること、腐食位

置付近に局所的な破壊の進展を招く傾向にあることなどが確認できた。結果の一例を図-5に示す。今後は、衝撃荷重載荷時の過渡応答を計算できる手法に拡張していく必要がある。

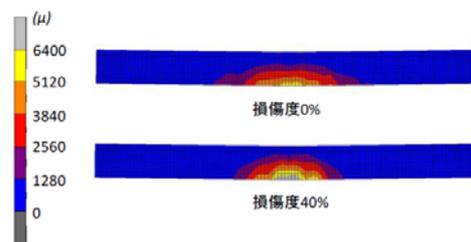


図-5 付着損傷度の影響 (解析結果の一例)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計4件)

①玉井宏樹, 千盛鳳, 合屋智史, 園田佳巨: Case study of damage of pc bridge by vehicle collision and its numerical analysis, 10th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 2013.11.25 ~ 2013.11.26, Singapore

②合屋智史, 玉井宏樹, 園田佳巨: 大型車両積載コンテナの衝突を受けるPC橋梁の損傷度に関する解析的検討, 平成25年度土木学会西部支部研究発表会, 2014.3.8, 福岡大学 (福岡県)

③二村俊輔, 園田佳巨, 玉井宏樹: 損傷力学モデルを用いた劣化したRCはりの残存耐力評価に関する基礎的研究, 第2回九州橋梁・構造工学シンポジウム論文集, 2014.12.19, JR博多シティ10階会議室 (福岡県)

④桑原功旺, 玉井宏樹, 園田佳巨, 樋原弘貴: 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実験的研究, 土木学会第70回年次学術講演会, 2015.9.16~2015.9.18, 岡山大学 (岡山県) 【予定, 発表確定】

6. 研究組織

(1)研究代表者

玉井宏樹 (TAMAI, Hiroki)

九州大学大学院・工学研究院・助教

研究者番号: 20509632