

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06183

研究課題名(和文) 衝撃的外力を受ける劣化したコンクリート構造物の残存耐荷性能評価

研究課題名(英文) Evaluation of residual load carrying capacity of deteriorated concrete structure subject to impact external force

研究代表者

玉井 宏樹 (TAMAI, HIROKI)

九州大学・工学研究院・助教

研究者番号：20509632

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：鉄筋腐食により劣化した防護構造物の残存耐荷性能を定量的に明らかにするために、電食により劣化したRC梁や版に対して、低速度及び中速度衝撃実験を実施した。その結果、低速度衝撃荷重下では静的荷重下よりも残存耐荷性能が著しく低下し、かぶりコンクリートの剥落に伴い破壊が脆性的になること、中速度衝撃荷重下では、腐食の影響で破壊過程が変化することが確認できた。また、腐食を考慮したモデル化により数値解析で同様の傾向を明らかにした。また、腐食の位置的ばらつきを考慮した解析をFEMにより実施し、その妥当性を検証した。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify quantitatively the residual load carrying capacity of protective structures deteriorated by corrosion of steel bars, low speed and medium speed impact tests were conducted on RC beams and slabs that were deteriorated by electrolytic corrosion. As a result, under low speed impact load, residual load carrying capacity remarkably decreased compared with under static load, destruction became brittle with the peeling of the covering concrete, under the middle speed impact load, the breaking process can be confirmed to change. In addition, the same trend was clarified by numerical analysis by modeling considering corrosion. In addition, analysis with consideration of positional variation of corrosion was carried out by FEM and its validity was verified.

研究分野：構造工学

キーワード：鉄筋腐食 コンクリート 残存耐荷性能 耐衝撃性能 衝撃実験 FEM

1. 研究開始当初の背景

(1)国土交通白書(平成25年)には、高度経済成長期以降に整備したインフラが急速に老朽化し、今後20年間で建設後50年以上経過する施設の割合が加速度的に高くなる見込みであることが示されている。そのような状況の中、橋梁やトンネルなどに関しては、維持管理技術に関する様々な研究が近年までに多数実施され、まだ研究途上であるとはいえ、合理的な維持管理に資する重要なデータが蓄積されてきている。

(2)一方で、我が国を取り巻く環境として、自然災害の大規模化や多発化は無視できない問題であり、災害発生危険地域においては、落石に対してはロックシェッドなどの落石防護工、土石流に対しては砂防堰堤、急崖地の崩壊土砂に対しては防護擁壁などの防護構造物が建設されてきており、これらの防護構造物は災害に対するハード対策として一定の効果を発揮しているといえる。しかし、防護構造物の多くも、橋梁やトンネルなどの構造物のように経年劣化により全体的または局所的に損傷したものが多く、「設計当初の機能を保持しているか?」、「設計時に想定した衝撃的な外力に耐えるか?」などの疑問があるが、これらに対する検討は殆どなされていない現状にある。

2. 研究の目的

経年劣化したインフラストックの増加や自然災害の多発といった我が国の現状を踏まえ、本課題では、橋梁などの構造物に比べて特に知見が不足している経年劣化により局所損傷を有するRC製防護構造物を対象に、自然災害で起こりうる衝撃的な外力に対する安全性や機能性の確保を目的とし、実験・解析の両面からその残存耐荷性能を力学的に明らかにし、さらに、維持管理技術に資する防護構造物の健全度評価法を確立する。具体的には、促進劣化した部材を用いた衝撃実験により、局所損傷の種類と程度が耐衝撃性に及ぼす影響を把握し、それらの損傷程度を初期損傷として考慮できる力学モデルを考案することで高度な数値解析手法を構築する。さらに、損傷程度と残存耐荷性能と非破壊検査出力値の相関を把握することで健全度評価法の基盤を確立する。

3. 研究の方法

上述の目的を達成するために、大別して、下記(1)~(3)の過程に基づき研究を遂行した。

(1)局所損傷を有するRC部材の衝撃実験

部分的に促進劣化させるなど局所損傷を有するRC梁や版部材を製作し、低速~中高速衝撃実験を実施し、局所損傷の種類や程度が耐衝撃性能に及ぼす影響を明らかにする。また、同時に非破壊検査を実施し、損傷度と出力値の関係を把握する。

(2)初期損傷を考慮できる力学モデルの考案とそれを導入した衝撃解析

既設部材の状態を模擬するために初期損傷を考慮できる力学モデルを考案し、それを有限要素解析に導入して、先に実施した実験を対象とした衝撃応答解析を実施し、妥当性・有用性を検証する。

(3)RC製防護構造物の健全度評価法の確立

実構造物を対象に、局所損傷の位置的ばらつきを与えた解析により、局所損傷の位置や程度と残存性能の関係から健全度を評価する。

4. 研究成果

(1)鉄筋腐食により劣化したRC梁部材の耐衝撃性能に関して得られた知見(低速度衝撃実験)

鉄筋腐食により劣化したRC梁部材の静的荷重下と衝撃荷重下の挙動の違いや腐食程度による残存耐荷性能といった基礎事項を把握するために、電食により促進劣化させたRC梁部材の低速度衝撃実験を実施した。さらに、局所損傷を考慮した数値解析モデルを構築し、その妥当性検証を実施した。得られた知見を整理すると以下の通りである。

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(図-1参照)が顕著であった。

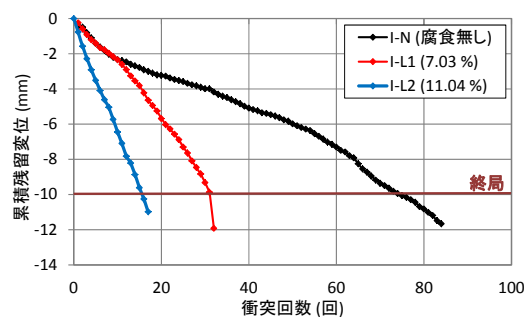


図-1 累積残留変位と衝突回数の関係

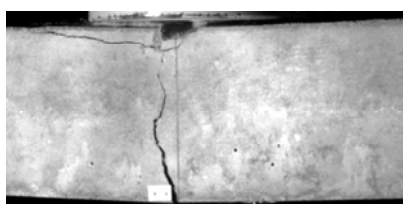
表-1 腐食率と耐衝撃性能の関係

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

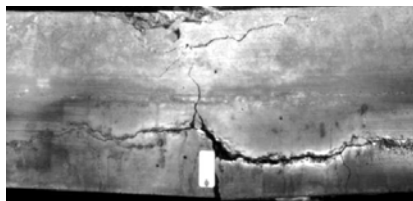
②破壊までの繰り返し回数は、腐食無しに比べて、腐食率約7%の場合に約4割に、腐食率10%の場合に約2割にまで低下し、腐食により許容可能な入力エネルギーが大幅に低下することが確認できた。(表-1参照)静的曲げ耐力比の場合は腐食率約12%で0.8~0.9程度であることを考えると、腐食により耐衝撃

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荷重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。(写真-1 参照)



(a) 腐食無しの場合 (75 回目)



(b) 腐食有りの場合 (16 回目)
写真-1 破壊性状の比較

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-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。

(2) 鉄筋腐食により劣化した RC 版部材の耐衝撃性能に関して得られた知見 (中速度衝撃実験)

鉄筋腐食により劣化した RC 版部材の衝撃荷重下の挙動を把握するために、電食により促進劣化させた RC 版部材の中速度衝撃実験を実施した。衝撃実験には、図-2 に示すエア加速式水平衝撃実験装置を用い、3kg の重錘を衝突速度約 15m/s で衝突させる実験とし、腐食率による破壊挙動の変化を確認することとした。得られた知見を整理すると以下の

通りである。

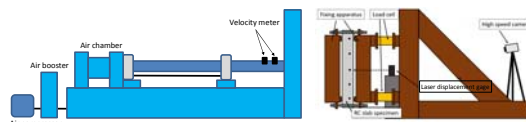


図-2 水平衝撃試験装置

①鉄筋が腐食することで、裏面剥離という最終的な破壊形態は変わらないが、それに至るまでの破壊過程が異なることが確認できた。
②表-2 に結果一覧を示す。特に注視すべきは、鉄筋腐食を有する供試体のほうが裏面剥離に至る衝突回数が多くなるという結果が得られたことであるが、同時に、貫入量は鉄筋腐食を有する供試体のほうが大きくなることから、鉄筋腐食を有する供試体では衝突エネルギーの散逸が生じているものと推察される。しかし、詳細については今後より検討が必要である。

表-2 結果一覧

Case name	Number of impact	Estimated maximum		Penetration depth (mm)	
		1 st impact	Final	1 st impact	Final impact
C0-N-1	2	178.83	101.57	1	2
C0-N-2	2	183.47	157.92	0	1
C0-B-1	8	189.26	30.45	0	50
C0-B-2	9	185.20	47.96	0	40
C5-N-1	4	93.15	82.02	0	7
C5-N-2	4	83.84	75.35	0	10
C5-B-1	9	-	-	0	45
C5-B-2	8	96.20	25.97	0	37

(3) 鉄筋腐食のばらつきを考慮した RC 防護構造物の解析手法について

鉄筋腐食の程度を腐食率として定義し、腐食率に応じた付着特性や鉄筋の有効断面積を用い、さらに、腐食率に応じた膨張量を鉄筋周辺のコンクリートに負荷することで、劣化状態をモデル化し、それらを位置的なばらつきを持たせてモデル化することで、鉄筋腐食のばらつきを考慮した RC 防護構造物の FEM による解析手法を提案し、その妥当性を検討した。

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)

[雑誌論文] (計 10 件)

①玉井宏樹, 桑原功旺, 園田佳巨, 鉄筋腐食による劣化を想定した RC 梁の耐荷性能および耐衝撃性能に及ぼす各要因の影響評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, 第 39 巻, 第 2 号, 2017, 553~558

②Chi Lu, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, A Numerical Study on the Impact Resistant Capacity of RC Beams with Corroded Reinforcement, Procedia Engineering, 査読有, Vol.210, 2017, 341~348

<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.11.086>

③Yang Sun, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda and Hirotoishi Obi, Experimental study on impact resistance of corroded RC beams reinforced by CFC plate, Proceedings of the 12th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures, 査読有, 第1巻, 2017, 409~418

④Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, A study on impact resistant capacity of RC slab with corroded reinforcement and its retrofitting method, Proceedings of the 6th International Conference on Design and Analysis of Protective Structures, 査読有, 第1巻, 2017, 559~564

⑤玉井宏樹, 桑原功旺, 園田佳巨, 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, 構造工学論文集, 査読有, Vol.63A, 2017, 1224~1236

⑥玉井宏樹, 桑原功旺, 園田佳巨, 鉄筋の腐食程度が腐食膨張圧やひび割れ発生に及ぼす影響に関する一考察, 土木構造材料論文集, 査読有, 第32号, 2016, 135~142

⑦ Isao Kuwahara, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, A study on the effect of corrosion rate of reinforcing steel on its expansion pressure and load bearing capacity of RC beam, Proceedings of the 41th Conference on Our World in Concrete & Structures, 査読有, 2016

⑧ Isao Kuwahara, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, Experimental study on impact load resistance of RC beam with corroded reinforcement, MATEC Web of Conferences, Vol.47, 査読有, 2016, 02004p.1~p.7
<http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20164702004>

⑧Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, Evaluation of Cumulative Damage of RC Members under Repeated Impact Loading, Applied Mechanics and Materials, 査読有, Vol.784, 2015, 500~507

⑩Hiroki Tamai, Isao Kuwahara, Yoshimi Sonoda, An experimental study on static and impact load resistance of RC beam with corroded reinforcement, Proceedings of the 40th Conference on Our World in Concrete & Structures, 査読有, 2015, 467~474

[学会発表] (計7件)

①Hiroki Tamai, Yang Sun, Yoshimi Sonoda and Hirotoishi Obi, A basic study on impact resistance of RC beams reinforced by continuous fiber composite panel, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017

②Chi Lu, Hiroki Tamai, Yoshimi Sonoda, Isao Kuwahara, A study on the load bearing capacity and impact resistance of RC beams with corroded reinforcement by FEM, 土木学会第72回年次学術講演会, 2017

③桑原功旺, 玉井宏樹, 園田佳巨, 鉄筋腐食した RC 梁部材の曲げ耐荷性能および耐衝撃性能に関する解析的検討, 土木学会第71回年次学術講演会, 2016

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

⑤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一考察, 第3回九州橋梁・構造工学研究会シンポジウム, 2015

⑥桑原功旺, 玉井宏樹, 園田佳巨, 鉄筋腐食により劣化した RC 梁部材の曲げ耐荷性能に関する解析的研究, 平成27年度土木学会西部支部研究発表会, 2015

⑦久保田崇嗣, 樋原弘貴, 添田政司, 西嶋大貴, 海洋環境下における表面含浸材の長期的なひび割れ補修効果に関する研究, 平成27年度土木学会西部支部研究発表会, 2015

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

(2) 研究分担者

樋原 弘貴 (HAZEHARA, Hirotaka)
福岡大学・工学部・助教
研究者番号: 70580182

宗本 理 (MUNEMOTO, Satoru)
愛知工業大学・工学部・講師
研究者番号: 70737709