

鋼材腐食の進行に伴うコンクリート表面の変形性状に関する解析的検討

阿南工業高等専門学校 正会員 ○角野 拓真
香川大学創造工学部 正会員 岡崎慎一郎
茨城大学工学部 正会員 車谷 麻緒

1. はじめに

鋼材腐食による鉄筋コンクリート（以降、RC）構造物の剥離・剥落といった変状は、コンクリート片の落下事象に繋がるため、公衆安全性を脅かす社会的に重大な問題である。実務では、コンクリート片の落下抑制を目的に、予防保全的な維持管理の実施が求められている。合理的な予防保全措置を実施するためには、剥離・剥落の予兆を早期に検知し、ライフサイクルコストを考慮した上で、必要な範囲等を適切に定める必要がある。

本研究では、コンクリート表面の変形等から RC 構造物の変状状態を検知することを目的に、破壊力学に基づく連続体損傷モデルを用いた損傷シミュレーションにより、鋼材腐食の進行に応じたコンクリート表面の微視的な変形性状に着目した検討を実施する。

2. 解析概要

本研究では、車谷らが提案した準脆性材料の破壊力学に基づく連続体損傷モデル¹⁾を用いた損傷シミュレーションにより、鋼材腐食の進行に応じたコンクリート表面の微視的な変形性状を把握することとした。鉄筋は、非線形等方硬化則に基づく von-Mises 塑性モデルを適用する。また、コンクリートは、準脆性材料の破壊力学を考慮した修正 von-Mises モデルを用いて、コンクリートの弾性限界後のひび割れの進展挙動をモデル化する。等価ひずみ ϵ_{eq} と等価応力 σ_{eq} の関係は、損傷変数 D を用いて表し、損傷が無ければ 0、完全に破壊すれば 1 となる。

解析モデルの概要を図-1 に示す。幅 400mm×高さ 200mm の 2 次元の平面要素をコンクリートとし、その上辺をコンクリートの表層と仮定した。平面要素の下辺は完全拘束とし、鉄筋部に 1Step あたり 0.001mm の鉛直上方変位を与えることにより、鋼材腐食による膨張を模擬した。要素は、三角形要素で分割し、いずれのケースも、要素数は概ね 30,000 である。

表-1 に解析ケースを示す。コンクリートの設計基準強度 f_{ck} は 18N/mm² で一定とし、鉄筋径 ϕ およびかぶり c を変動させた。表-2 に解析に用いる材料特性の諸元を示す。コンクリートの材料特性の諸元は、 f_{ck} をもとにコンクリート標準示方書²⁾を参考に定めた。なお、 G_f は粗骨材の最大寸法を 20mm と仮定し算定するとともに、 ϵ_0 は引張強度 f_t 時のひずみとした。また、鉄筋は解析途中で損傷が生じないよう G_f および ϵ_0 を比較的高く設定し、剛材を模擬した。

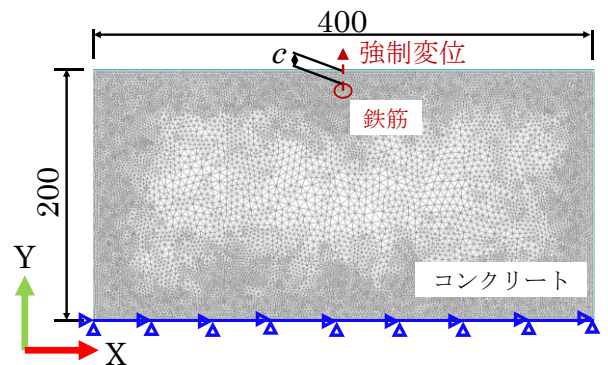


図-1 解析モデルの概要図

表-1 解析ケース

Case	f_{ck} (N/mm ²)	鉄筋径 ϕ (mm)	かぶり c (mm)
Case1	18	13	10
Case2	18	13	30
Case3	18	13	50
Case4	18	32	10
Case5	18	32	30
Case6	18	32	50

表-2 解析に用いた材料特性の諸元

材料	E (kN/mm ²)	ν	k	G_f (N/m)	ϵ_0
コンクリート	22	0.2	11.4	7.11E-02	7.18E-05
鉄筋	200	0.3	1	1.00E+00	1.00E+11

ここに、 E は弾性係数、 ν はポアソン比、 k は引張圧縮強度比、 G_f は破壊エネルギー、 ϵ_0 は破壊発生ひずみである。

キーワード 鉄筋コンクリート構造物、剥離・剥落、鋼材腐食、コンクリート表面の変形性状

連絡先 〒774-0017 徳島県阿南市見能林町青木 265 阿南工業高等専門学校創造技術工学科 TEL 0884-23-7100

3. 結果と考察

一般に、鋼材腐食深さ γ は、鋼材全周の一様な腐食を仮定し理論値を定めている^{2) 3)}。そのため、図-2に示すとおり、変位により模擬した鋼材の腐食範囲 A_{ana} と鋼材全周に換算した場合の腐食範囲 A_{cal} が同等となる換算膨張変位 I を求め、最終的に鋼材腐食深さ γ に換算した。なお、本研究では、腐食生成物の体積膨張率を2.0と仮定し、鋼材腐食深さ γ を求めた。

図-3にCase1のコンクリート標準示方書²⁾に示す $S_{lim}/0.3$ 時の損傷変数 D のコンター図を示す。ここで、損傷変数 D の分布は、正確には損傷の分布であるが、要素サイズを小さくしているため、近似的にひび割れの分布と見なすことができる。鋼材腐食の進行に伴い鋼材直上に発生するひび割れや鋼材から表層に向かって進展する剥離・剥落に繋がるひび割れが模擬できていること確認できる。なお、その他のケースにおける損傷変数の分布は、図-3と概ね同様の傾向であった。

図-4および図-5に、Case2およびCase5の鋼材腐食の進行に伴う表面形状の推移を示す。なお、図中には $S_{lim}/0.3$ 時および鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物(以降、鉄道標準)³⁾に示されるひび割れの発生限界鋼材腐食深さ γ_{el} 時の表面形状を代表して示す。いずれのケースも鋼材腐食の進行に伴い、鉄筋位置を頂点に三角状に表層変位が発生していることが分かる。また、 γ_{el} 時のコンクリート表層変位に着目すると、Case2の方がコンクリート表層変位の最大値が大きいことが分かる。これは、 γ_{el} が c と ϕ の関数であるため、 ϕ の増加に伴い、 γ_{el} が小さくなるためである。一方で、 $S_{lim}/0.3$ 時の表層変位の最大値は、Case2とCase5で同程度であるものの、Case5の方が、表層変位が生じるX方向の範囲が広範囲化することが分かった。

4. まとめ

本研究では、破壊力学に基づく損傷シミュレーションにより、鋼材腐食の進行に応じたコンクリート表面の変形状態に着目した検討を実施した。その結果、鋼材腐食の進行に伴い鋼材直上を頂点として、コンクリート表面に三角状に表層変位が発生することを確認した。また、鋼材径が表層変位量の最大値に及ぼす影響は小さいものの、鋼材径が大きくなることにより表層変位が生じるX方向の範囲が広範囲化することが分かった。

参考文献

- 1) 車谷麻緒, 根本優輝, 相馬悠人, 寺田賢二郎, コンクリートの破壊力学を考慮した鉄筋コンクリートの3次元破壊シミュレーションとその性能評価, 日本計算工学会論文集, Vol.2016, pp.20160004, 2016
- 2) 土木学会: 2017 制定コンクリート標準示方書(設計編), pp.151-152, 2017.
- 3) 公益財団法人鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)コンクリート構造物, pp.222-233, 丸善出版, 2007.

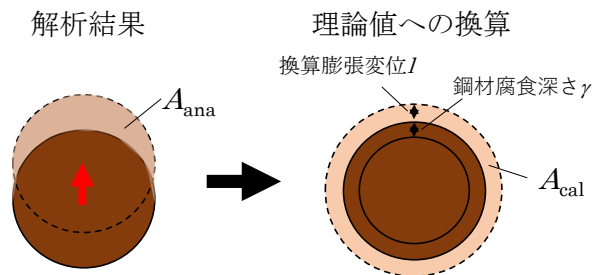


図-2 解析結果の鋼材腐食深さへの換算

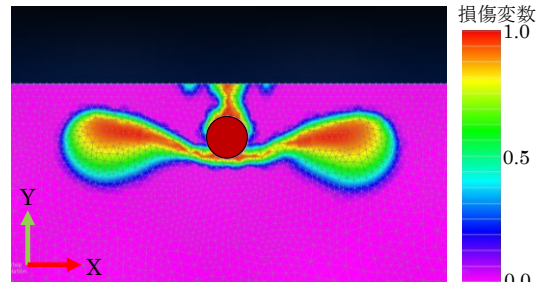


図-3 損傷変数の分布(Case1: $S_{lim}/0.3$ 時)

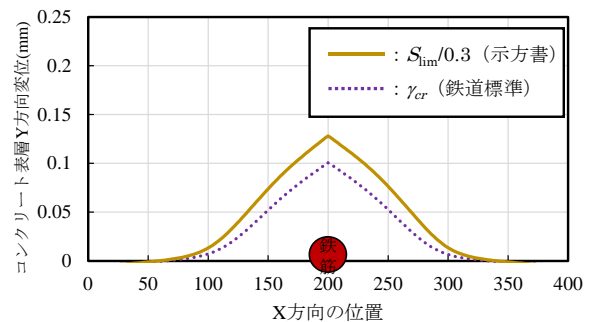


図-4 表面形状の推移(Case2: $c30\text{mm}, \phi 13$)

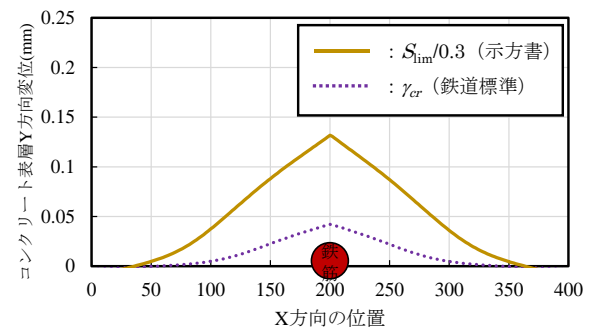


図-5 表面形状の推移(Case5: $c30\text{mm}, \phi 32$)