

粒子法を用いた鉄筋腐食があと施工アンカーの耐荷性能に与える影響の評価

路馳¹玉井宏樹¹

¹九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

RC 構造物では塩害などにより鉄筋腐食が進行し、断面欠損や付着性能の低下、腐食膨張によるひび割れが生じることで、アンカーボルトの引き抜き耐力・破壊過程に影響を及ぼす可能性がある。そこで本研究では、鉄筋腐食がアンカーボルトの引抜き耐力および破壊形態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、SPH 法と有限要素法を用いたシミュレーションおよび、基礎的検討を行う。

1. はじめに

アンカーボルトは既設コンクリート構造物の補強部材等の接合に用いられ、引抜き耐力や破壊形態は母材コンクリートの状態に左右される。我が国の社会資本は、高度経済成長期以降の整備により経済成長や生活基盤を支えてきたが、近年は急速な高齢化が進んでいる。令和 4 年度国土交通白書¹⁾によれば、建設後 50 年を経過する社会資本の割合は、令和 2 年度から 20 年後にかけて、道路橋で約 30%から約 75%、トンネルで約 22%から約 53%、河川管理施設で約 10%から約 38%、下水道管渠で約 5%から約 35%、港湾施設で約 21%から約 66%へ増加する。このため、老朽化に伴う損傷事故や維持管理費の増大が懸念されており、既設構造物の性能を適切に評価し、合理的に維持管理・更新を進める手法の整備が求められている。

鉄筋コンクリート (RC) 構造物の代表的な劣化要因には、塩害、中性化、アルカリ骨材反応、疲労などがある。なかでも日本では、海塩粒子や凍結防止剤の影響により、塩害に起因する鉄筋腐食が重要な課題である。鉄筋腐食は断面減少だけでなく、腐食膨張によるひび割れの発生・進展や、鉄筋とコンクリートの付着性能低下を引き起こし、RC 構造物の残存耐力や破壊挙動に影響を及ぼす。したがって、腐食劣化した RC 構造物の性能を適切に評価することは、補修・補強の時期や工法の選定、維持管理計画の立案において重要である。典型的なアンカーボルトの破壊例を図 1 に示す。

アンカーボルトは、既設コンクリートに他部材を接合できるため、落橋防止装置や耐震補強部材の接合に広く用いられている。引抜き荷重を受けるアンカーボルトの破壊形態には、ボルト破断、コンクリートのコーン破壊、付着破壊、およびそれらが混在する複合破壊モードがある。既往研究²⁾では、アンカーボルト径や埋込み深さを变化させた解析により、これらの破壊形態の推移や複合破壊モードの再現が行われている。しかし、これらの多くは母材コンクリートが健全であることを前提としており、図 2 のような鉄筋腐食に起因する

ひび割れや付着特性の変化がアンカーボルトの引抜き耐力や破壊形態に及ぼす影響は十分に明らかになっていない。



図 1 アンカーボルトの破壊が梁の中央スパンに発生する例

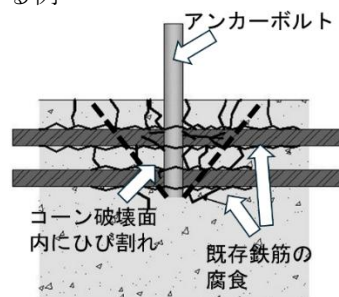


図 2 既存鉄筋の腐食によりアンカーの破壊面にひび割れが生成

そこで本研究では、鉄筋腐食により劣化した RC 部材に設置されたアンカーボルトを対象に、腐食の進行が引抜き耐力と破壊形態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。具体的には、鉄筋断面積の減少、鉄筋-コンクリート間の付着低下、腐食膨張に伴うひび割れ形成を考慮した解析モデルを構築し、腐食率や鉄筋とアンカーボルトの位置関係を変化させた引抜き解析を行う。解析には SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法と有限要素法 (FEM) の連成手法を用い、コンクリートの損傷形成からアンカーボルトの引抜き破壊までを一体的に評価することで、腐食条件下におけるアンカーボルト引抜き性能の合理的評価に資する基礎的知見を得ることを目指す。

2. 数値解析手法

本研究では、FEM では再現が困難なコンクリートの局所破壊現象を解析するため、代表的なメッシュフリー法の一つである SPH 法を採用した。本研究では、FEM では再現が困難なコンクリートの局所破壊現象を解析するため、代表的なメッシュフリー法の一つである SPH 法を採用した。各粒子の物理量は、図 3 に示すように、カーネル関数を用いて近傍粒子の重み付き平均として評価される。SPH 法の基本式は、式(1)および式(2)で表される。

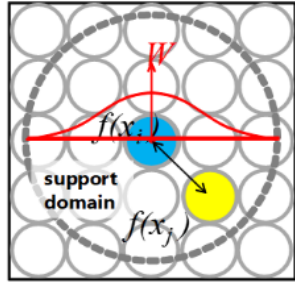


図 3 SPH 粒子の影響領域 (カーネル関数)

$$\langle f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (1)$$

$$\langle \nabla \cdot f(x_i) \rangle = \int_{\Omega} f(x_j) \cdot \nabla_i W(x_i - x_j, h) dx_j \quad (2)$$

離散形では、式(3)および式(4)となる。

$$\langle f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) W_{ij} \quad (3)$$

$$\langle \nabla \cdot f(x_i) \rangle = \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} f(x_j) \cdot \nabla_i W_{ij} \quad (4)$$

ここで、 W はカーネル関数、 h は平滑化長さ、山括弧内は SPH 近似、 Ω は支持領域内の積分領域、 x_i, x_j はそれぞれ粒子 i, j の位置、 m_j は粒子 j の質量、 ρ_j は粒子 j の密度、 $W_{ij} = W(x_i - x_j, h)$ 、 N は支持領域内に存在する近傍粒子数である。

SPH 領域と FEM 領域は、SPH 粒子と FEM 要素の外表面との間でペナルティ法を基準とした接触方法によって結合される (図 4)。法線方向の接触判定に用いる距離は、以下の式(5)によって定義される。

$$g_n^{(1)} = (\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_q) \cdot \mathbf{n}_q^{(1)} \quad (5)$$

ここで $\mathbf{x}_p, \mathbf{x}_q$ はそれぞれ粒子 p とメッシュ q の中心位置である。接触力は、法線方向 (貫通抵抗) と接戦方向 (摩擦) に分解され、いずれも表面 1 の局所座標系で表される。内部法線応力 σ_v は侵入体積増分 $\Delta V = \Delta \Delta g$ を用い式(6)のように更新される。

$$\sigma_v^{(1),n+1} = \max \left(0, \sigma_v^{(1),n} + E_{eq} \frac{\Delta V^{(1)}}{V_p} \right) \quad (6)$$

V_p は粒子の体積である。ここで Δg は、1 ステップにおける法線方向の侵入深さである。SPH 粒子と FEM 要素の剛性を組み合わせた等価弾性率 E_{eq} は式(7)のように定義される。

$$E_{eq} = \frac{2E_e E_p}{(1 - \nu_e^2)E_p + (1 - \nu_p^2)E_e} \quad (7)$$

E_p, ν_p と E_e, ν_e はそれぞれ接触する SPH 粒子と FEM 要素のヤング率とポワソン比である。

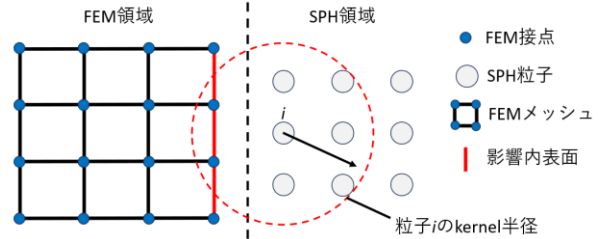


図 4 SPH-FEM 間の接触探索法

接着された界面 (例: アンカーボルトとコンクリートの界面) については、界面の付着や、荷重によって生じる剥離の挙動を表現するために、選択した粒子-メッシュの組に対して、接線方向の付着 (bond-slip) 構成則を与える。

接線方向の付着-すべり関係は包絡線 $\tau_d^{env}(|s_d|)$ ($d \in \{m, s\}$) に定義される。(図-5) 包絡線はすべり量に対して最大せん断付着力を与え、一方でキャップ値 τ_d^{cap} は試行付着力が現時点のすべり量における包絡線上を超過しないように拘束する。

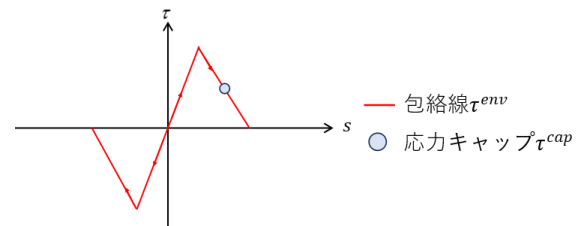


図 5 付着モデルの包絡線

各接線方向について、すべり増分を $\Delta s_d^{n+1} = s_d^{n+1} - s_d^n$ とし、試行付着力を τ_d^{tr} を式(8)に、キャップ値 τ_d^{cap} を式(9)示す。このとき、 k_d は接線剛性である。

$$\tau_d^{tr} = \tau_d^n + k_d \Delta s_d^{n+1} \quad (8)$$

$$\tau_d^{cap} = \tau_d^{env}(|s_d^{n+1}|) \quad (9)$$

最終的な付着力はキャップ値による上限を満足するように定め、更新後の接線付着力 τ_d^{n+1} は式(10)と表される。

$$\tau_d^{n+1} = \text{sgn}(\tau_d^{tr}) \min(|\tau_d^{tr}|, \tau_d^{cap}) \quad (10)$$

3. 材料モデル

本章では、本研究で対象とするコンクリート材料と鋼材の力学モデルと材料構成則、および SPH 解析への適用について述べる。

3.1 von Mises の降伏条件

鋼材について、von Mises の降伏条件を適用する。以下の式(11)に von Mises の降伏条件式を、図5に von Mises の降伏曲面を示す。

$$f(J_2) = J_2 - k^2 = 0 \quad (11)$$

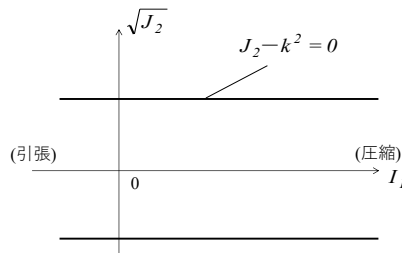


図-5 von Mises の降伏曲面

なお、式(11)において、 J_2 : 偏差応力の 2 次不変量、 k : 正の材料定数であり、単軸応力状態で降伏強度 σ_y を考慮することにより、式(12)で表される。

$$k = \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

3.2 Drucker-Prager の降伏条件式

コンクリート材料は異方性や圧縮依存性が複雑であり、数値解析の安定化のために適切な材料特性を導入する必要がある。以下の式(13)に Drucker-Prager の降伏条件式を示す。

$$f(J_2, I_1) = \sqrt{J_2} + \alpha I_1 - k = 0 \quad (13)$$

ここで、 I_1 : 応力の 1 次不変量、 J_2 : 偏差応力の 2 次不変量、 α 、 k : 式(14)に示す材料によって決まる定数である。

$$\alpha = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_t)}, \quad k = \frac{2\sigma_c\sigma_t}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_t)} \quad (14)$$

式(14)に示すように、材料定数 α 、 k は、一般的に σ_c : 圧縮強度と σ_t : 引張強度で表され、またこのとき、 σ_c 、 σ_t は正の値である。図6に Drucker-Prager の降伏曲面を示す。

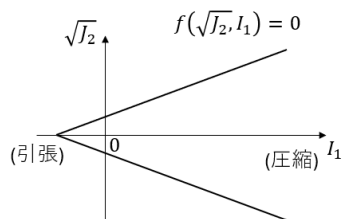


図-6 Drucker-Prager の降伏曲面

一般的にコンクリート材料では、引張側においてひずみの増加とともに応力が引張強度に達し、

その後応力が減少するという特性があり、この特性を引張軟化と呼ぶ。引張強度近傍においてコンクリートに微細ひび割れが発生し、その中で最も弱い部分に損傷が集中し微細なひび割れ領域が形成される。最終的に大きなひび割れが発生し、断面が小さくなり伝達される応力が減少することで、引張軟化が発生すると考えられている。本研究では、図7のようなコンクリート標準示方書⁴⁾で定義された引張応力軟化経路を考える。

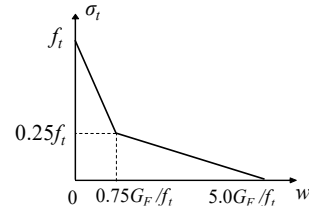


図-7 想定引張軟化経路

ここで、 σ_t : 引張応力、 w : ひび割れ幅、 f_t : コンクリート材料の引張強度、 G_F : コンクリートの破壊エネルギーである。

コンクリート材料では、圧縮側においても引張側と同様に軟化や断面剛性の低下が生じる特性がある。しかしながら、圧縮側は引張側よりも強度が高いため、引張側の挙動ほど顕著ではない。

解析における圧縮応力軟化の計算手順については、前述した引張側と同様である。圧縮軟化については popovics 式⁵⁾を用いた。圧縮破壊の場合、引張破壊とは異なり破壊後も応力伝達が少なからず行われるために引張側ほど軟化しない。そのため軟化後は、圧縮抵抗性を表すために下限値を設けた。

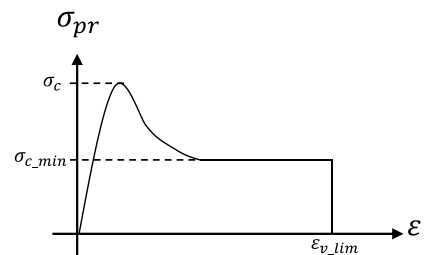


図-8 想定圧縮軟化曲線

ここで、 σ_c : コンクリートの圧縮強度、 ϵ_{pr} : 圧縮主ひずみ(引張成分は無視)、 $\epsilon_{v,lim}$: 圧潰ひずみである。損傷計算は圧縮軟化の減少率で行い、下限値を引張側より低い数値として設定した。

4. 鉄筋腐食の数値的な再現

RC 構造物の鉄筋腐食による劣化を適切にモデル化するためには、①鉄筋の断面積減少、②鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下、③腐食生成物の膨張による鉄筋周辺コンクリートのひび割れといった三つの事象を考慮する。そこで、本研究

では、この三つの事象について腐食率と関連付けることで次節に示すように表現することとした。

4.1 鉄筋の断面積減少

鉄筋腐食による鉄筋の断面積減少は、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性能を低下させることで表現することとした。つまり、解析モデルの見かけ上の鉄筋断面積は変化させずに、入力データである鉄筋の力学性能を低下させた（図-9）。

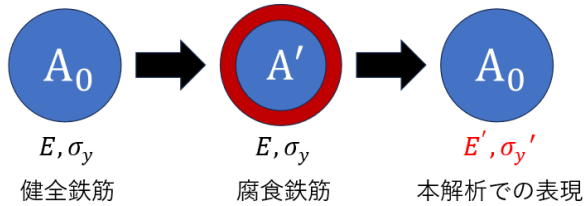


図9 鉄筋断面積減少の表現

既往の研究において李ら³⁾は、腐食した鉄筋の引張試験を実施することで、鉄筋の腐食率をパラメータとした静弾性係数低下率および降伏強度低下率の算出式を提案しているが、本研究では簡易的に鉄筋の腐食率と損傷が等しいものと仮定し、式(15)を用いて腐食鉄筋の静弾性係数 E' と降伏強度 σ_y' を算出した。

$$E' = \left(1 - \frac{c}{100}\right)E \quad \sigma_y' = \left(1 - \frac{c}{100}\right)\sigma_y \quad (15)$$

ここで、 E および σ_y は健全鉄筋の静弾性係数および降伏強度、 c は鉄筋の腐食率である。

4.2 鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下

鉄筋の腐食に応じた付着性能の低下に関しては、既往の研究結果⁶⁾から付着強度の低下率を推定し（図-10）、付着応力-変位関係に導入している（図-11）。

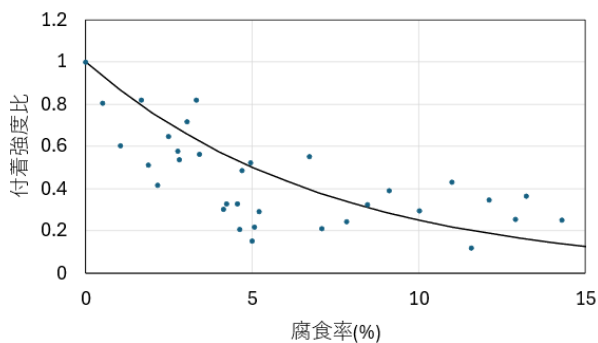


図10 付着性能と腐食率の関係

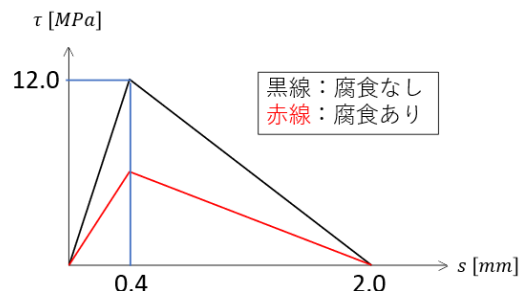


図11 付着性能低下の表現

4.3 腐食生成物の膨張による鉄筋周辺コンクリートのひび割れ

腐食生成物の膨張によるコンクリートのひび割れは、アンカーボルト引き抜き前に腐食率に応じた力を与え再現する。具体的には、界面法線方向の目標膨張変位 $u_{target} = r_0(\sqrt{1 + (\alpha - 1)\eta} - 1)$ (r_0 : 初期鉄筋半径, η : 腐食率, α : 膨張率) として定義し、 u_{target} と r_0 の差(gap)を計算する。そのgapに比例したばね反発力 $F = k \cdot gap$ を、図-12のように鉄筋周辺のコンクリート粒子に付与し、ひび割れを表現する。ばね定数は $k = EA/L$ (E : コンクリートのヤング率, A : コンクリート粒子の断面積, L : コンクリート粒子の粒径) である。

なお、膨張率 α はAndradeら⁷⁾が導き出した、コンクリートの最大ひび割れ W_{max} を求める式(16)(17)を用いて計算した値と、解析結果から求められるコンクリートの最大ひび割れが一致するように設定した。

$$W_{max} = 15.863 \left(\frac{x_{ave}}{r_0} \cdot CT\right)^{0.928} \quad (16)$$

$$CT = \left(0.63 \cdot \frac{c}{\phi}\right)^{-\frac{1.41}{f_{ct}}} \quad (17)$$

ここで、 x_{ave} は鉄筋半径減少量、 r_0 は腐食前鉄筋半径、 c は鉄筋のかぶり厚さ、 ϕ は鉄筋直径、 f_{ct} はコンクリート引張強度である。

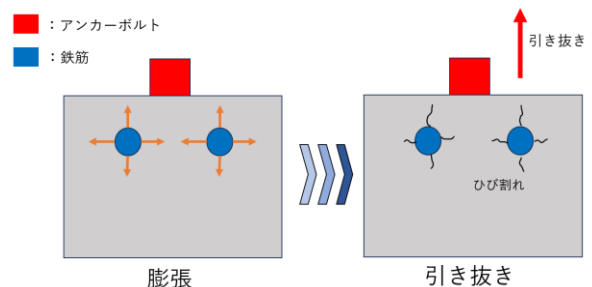


図12 付着性能低下の表現

5. 解析概要および解析結果

本章では、前章で述べた解析手法を用いて実施するアンカーボルトの引抜き解析の概要及び解析結果と考察について述べる。

5.1 アンカーボルト引き抜き解析概要

図-13 に、アンカーボルトの引き抜き解析で用いるモデルを示す。引き抜き解析は、アンカーボルト上端から2層の接点に強制変位を加えることで実施した。なお、上部構造物に与える強制変位の速度は0.1m/sとした。

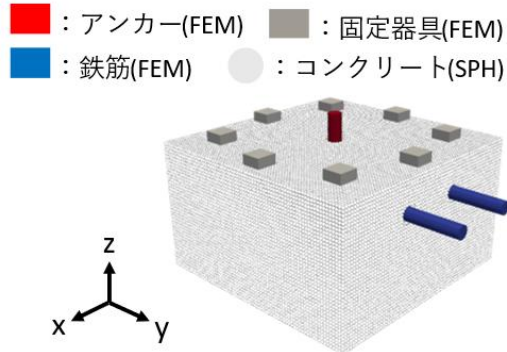


図13 解析モデル

コンクリートブロックの寸法は、 $W=175\text{mm}$ 、 $L=175\text{mm}$ 、 $H=100\text{mm}$ であり、直径2.5mmの粒子を用いて離散化した。アンカーボルトはコンクリートブロックの中央に埋め込み、直径10mm、埋め込み深さ50mm(5d)とした。さらに、内部鉄筋として直径10mm(D10)の鉄筋を2本配置し、かぶり厚さを20mmに固定したうえで、アンカーボルトとの距離が異なる3条件(A:50.0mm, B:32.5mm, C:20.0mm)を設定した(図-14)。また、引き抜き時にコンクリートブロックが浮き上がらないよう、固定器具として図-13のように直方体鋼材を設置した。

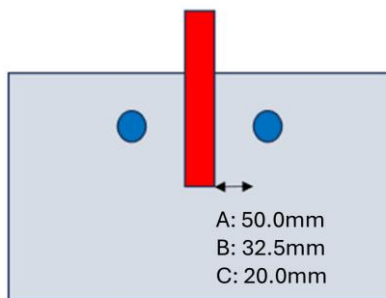


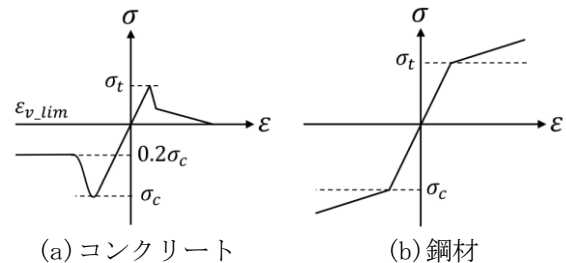
図14 鉄筋位置

本解析では、コンクリートブロック内部の鉄筋が腐食する状況を想定し、腐食進行の影響を段階的に把握するため、腐食率を5%、10%、15%の3条件で与えた。なお、腐食率 c は鉄筋の質量減少率を表すまた、表-1に本解析モデルの材料特性値、図-15にコンクリートと鋼材の単軸換算した応力-ひずみ関係を示す。コンクリートブロックはコンクリート材料、アンカーボルトと内部鉄筋、固定器具は鋼材として力学モデルを適応し、この材料特性値をもとに力学計算を行う。この解析モデルにおいて、前章で述べた付着特性を導入するにあ

たって、最大付着応力に達する変位および、付着切れが発生する変位はそれぞれ、0.4mm、2mmと設定した。付着応力-変位関係は図-16示すとおりである。

表-1 解析モデルの材料特性値

材料特性		
	コンクリート	鋼材
圧縮強度 (MPa)	39.4	345
引張強度 (MPa)	2.66	345
ポアソン比	0.2	0.3
密度 (kg/m ³)	2,350	7,800
ヤング率 (GPa)	35	210
付着特性		
最大付着強度 (MPa)	最大付着強度時スリップ量 (mm)	終局スリップ量 (mm)
12	0.4	2



(a) コンクリート

(b) 鋼材

図-15 単軸換算した応力-ひずみ関係

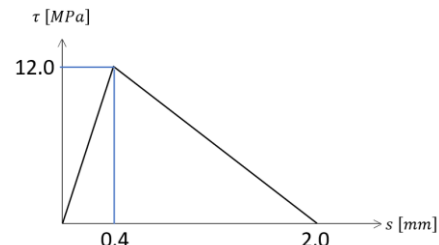
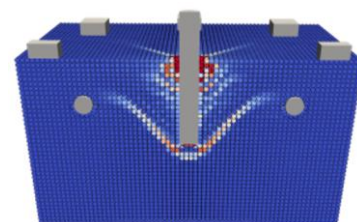


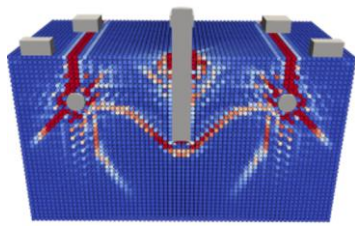
図-16 付着応力-変位関係

5.2 解析結果

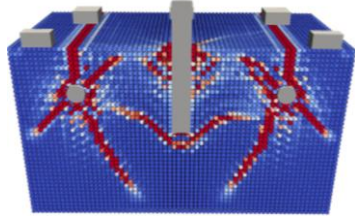
はじめに各条件のコンクリートのひび割れを確認するための指標として最大主ひずみ分布を以下の図-16~図-18に示す。最大主ひずみは物質の引張状態を表す指標であり、その値が0.01付近に達する領域で、ひび割れが発生していると考えることができる。



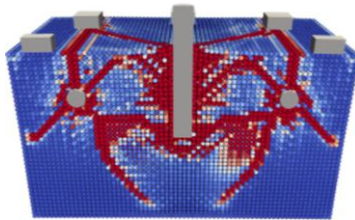
(a) 腐食率0%



(b) 腐食率 5%

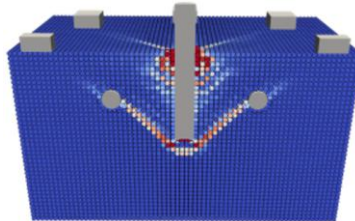


(c) 腐食率 10%

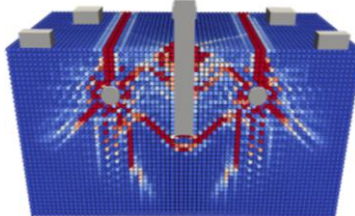


(d) 腐食率 15%

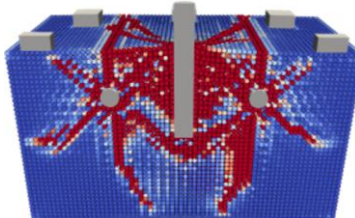
図 16 鉄筋位置 A の最大ひずみ分布図



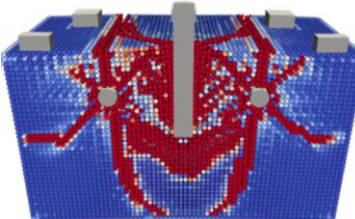
(a) 腐食率 0%



(b) 腐食率 5%

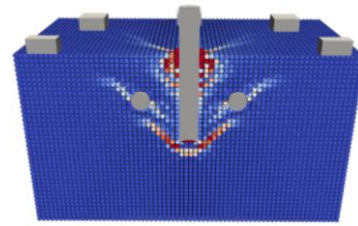


(c) 腐食率 10%

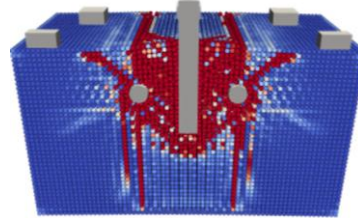


(d) 腐食率 15%

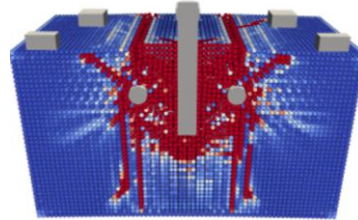
図 17 鉄筋位置 B の最大ひずみ分布図



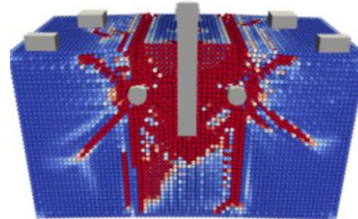
(a) 腐食率 0%



(b) 腐食率 10%



(c) 腐食率 10%



(d) 腐食率 15%

図 18 鉄筋位置 C の最大ひずみ分布図

健全モデルにおいてアンカーボルト近傍からコーン状破壊を形成する高ひずみ帯が比較的明瞭に表れるのに対し、腐食モデルでは、鉄筋の膨張によって形成された高ひずみ帯が残存・拡大して現れ、結果としてひび割れが広範囲に広がっていることが確認できる。特に腐食率が高い条件ほど、その傾向が顕著に表れているのがわかる。

続いて腐食率・鉄筋位置ごとのアンカーボルト軸方向荷重と変位の関係を図-19 に、腐食率・鉄筋位置ごとの最大荷重増減率を表-2 に示す。これらの見ると、鉄筋位置 A では健全モデルと腐食率 5%、10%モデルの最大荷重は近い範囲にあり、最大荷重到達後は変位の増加に伴って比較的速やかに荷重が低下する挙動が示されている。一方、腐食率 15%のモデルでは最大荷重到達後の高変位域においても、荷重が残存していることが確認できる。鉄筋位置 B では腐食率の増加に伴い最大荷重が段階的に低下する傾向が読み取れるが、腐食率 5%では健全モデルより最大荷重がわずかに高い結果となっ

た。しかし、腐食率 10%、15%では最大荷重が低下しており、鉄筋位置 B においても腐食率の増加に伴って最大荷重が概ね低下することがわかる。鉄筋位置 C では、腐食率上昇に伴う最大荷重低下がより顕著に現れ、腐食率 10%、15%では高変位域まで荷重が落ちにくい区間が確認できる。

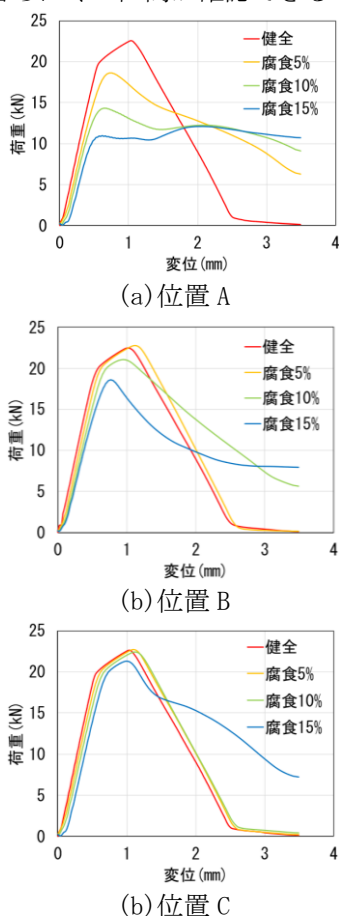


図 19 変位と荷重の関係

表-2 腐食率・鉄筋位置ごとの最大荷重増減率

腐食率	鉄筋位置 A	鉄筋位置 B	鉄筋位置 C
5%	+0.1%	+1.2%	-17.4%
10%	-1.2%	-6.4%	-36.5%
15%	-6.2%	-17.2%	-51.5%

5.3 考察

本節では、最大主ひずみ分布および荷重-変位関係を対応付け、腐食の進行と鉄筋位置がアンカーボルト引抜き挙動に及ぼす影響について考察する。

まず鉄筋位置の影響について検討する。鉄筋がアンカーボルトに近い配置では、腐食膨張で生じた初期ひび割れや損傷帯がアンカーボルト周辺まで到達しやすく、引抜き開始時点から付着抵抗を担うコンクリートが弱化した状態になる。さらに、引抜きで発達するコーン状破壊のひび割れがこの

損傷帯に早期に接続することで損傷が加速し、最大荷重の低下が大きく現れたと考えられる。一方、鉄筋が遠い配置では、初期ひび割れがアンカーボルト周辺に及びにくく、最大荷重への影響は相対的に小さい。

次に腐食率の影響について検討する。腐食率が大きくなるほど腐食膨張量が増加し、鉄筋周辺で形成されるひび割れの幅や分布範囲が拡大することで、コンクリート側の初期損傷は増大する。加えて、腐食の進行は鉄筋の力学特性と鉄筋-コンクリート間の付着特性も低下させるため、これらが重なって最大荷重は段階的に低下したと考えられる。

一方、一部条件では腐食モデルの最大荷重が健全モデルをわずかに上回った。これは、腐食に伴う負の影響よりも、膨張圧によってアンカーボルト周辺のコンクリート拘束が強まり、界面の接触力や摩擦力が一時的に増加した影響が相対的に大きく現れたためと考えられる。

また、一部の高腐食率モデルで最大荷重到達後に荷重が低下しにくい、あるいは再び増加する挙動が確認された点については、解析プログラムの境界条件設定に起因する可能性が高い。膨張段階で固定器具が周囲のコンクリート粒子に押されて浮き上がり、その状態のまま引抜き段階で変位拘束が付与されると、盛り上がるコンクリート粒子が固定器具と途中から接触し、接触反力が引抜き抵抗として荷重に加算され得る。実際に、荷重が再上昇し始める変位と固定器具下面に力が発生し始める時点は一致しており、本挙動は材料の本質的な応答というより接触条件の影響を含む可能性がある。

加えて、耐力低下要因を把握するために、鉄筋の断面積減少、鉄筋とコンクリート間の付着力低下、腐食生成物の膨張によるひび割れを個別に適用する追加解析を、「鉄筋位置 C・腐食率 15%」モデルを対象に行った。その結果、耐力低下には腐食生成物の膨張によるひび割れが最も支配的であり、断面積減少と付着力低下の単独影響は限定的で、ひび割れと組み合わせることで影響が顕在化すると考えられる。以上より、耐力低下の本質は、膨張により生じたひび割れがアンカーボルト周辺領域に入り、付着抵抗を担うコンクリートを脆弱化させる点にあり、鉄筋に近いほど、また腐食率が高いほどその影響は大きいと整理できる。

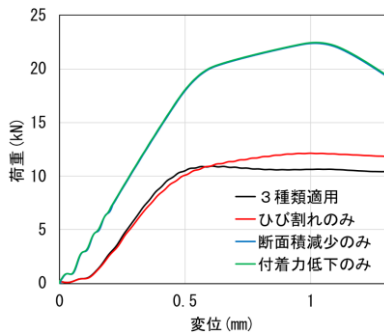


図 18 鉄筋腐食事象の個別適応解析結果

6. 結論

本研究は、アンカーボルトで接合された構造物におけるコンクリート部分が内部鉄筋の腐食により劣化している場合のシミュレーションを行い、アンカーボルトの破壊形態の変化及び引き抜き耐力の低減を評価するための数値解析及び検討を行い、SPH 法と有限要素法を用いた解析的な評価手法の提案について述べたものである。本研究で得られた成果をいかに要約する。

1. 鉄筋腐食した RC 部材に定着されたアンカーボルトを対象に、腐食率及び鉄筋位置をパラメータとした引き抜き解析を行った結果、腐食の進行及び鉄筋位置の違いにより、引き抜き耐力が低下するケースの存在が確認された。
2. 腐食率が高いほど、そして鉄筋位置がアンカーボルトに近いほど、引き抜き耐力が低下する傾向が確認できた。
3. 鉄筋腐食の影響を表現するために導入した 3 つの事象（鉄筋の断面積減少、鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下、腐食生成物の膨張による鉄筋周辺コンクリートのひび割れ）を個別に適用する解析を行ったところ、本解析条件では膨張によるひび割れの影響が支配的であり、その他 2 つは単独では影響が限定的である一方、ひび割れと組み合わせることで耐力低下への影響が顕在化することが確認された。
4. 本研究の鉄筋位置による影響差は、腐食膨張によって形成されるひび割れがアンカーボルト周辺の付着抵抗領域へどの程度侵入するかに起因すると整理できる。最大主ひずみ分布を比較すると、鉄筋位置がアンカーボルトに近いほどひび割れがその周辺に到達しやすく、引き抜き開始時点から周辺コンクリートが脆弱化していることが確認された。さらに、引き抜きに伴って発達するひび割れが膨

張時の初期ひび割れへと早期に接続しやすくなることで損傷進展が加速し、耐力低下の傾向が顕著に表れたと考えられる。

5. 本研究の腐食率による影響差は、腐食率の増加に伴う腐食膨張量の増加により、鉄筋周辺に形成されるひび割れ範囲が拡大し、コンクリートの初期損傷がどれほど増大するかに起因すると整理できる。加えて、鉄筋の断面積減少や鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下が重複し、引き抜き抵抗を担う要素が弱体化するため、腐食率の増加に伴って耐力低下の傾向が表れたと考えられる。

7. 謝辞

本研究の実施にあたり、一般社団法人九州建設技術管理協会「令和 7 年度建設技術研究開発助成」の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

8. 参考文献

- 1) 国土交通省：令和 4 年度国土交通白書
- 2) Lu C, Sonoda Y. An analytical study on the pull-out strength of anchor bolts embedded in concrete members by sph method. *Applied Sciences*. 2021 Sep 14;11(18):8526.
- 3) 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
- 4) 土木学会. コンクリート標準示方書. 2007.
- 5) S. Popovics: A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, *Cement and Concrete Research*, vol.3, pp.583-599, 1973.
- 6) 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
- 7) Carmen Andrade, Alessandro Cesetti, Giuseppe Mancini, Francesco Tondolo: Estimating corrosion attack in reinforced concrete by means of crack opening, *Structural Concrete*, vol.17, No. 4, pp533-540, 2016