塩害劣化を受けるRC部材の破壊モードを考慮した限界鉄筋腐食量の提案

香川大学　学生会員　○釜本拓哉　四国総合研究所　正会員　中川裕之
香川大学　正会員　岡崎慎一郎　香川大学　フェロー会員　松島学

1. はじめに

塩害劣化による鉄筋断面減少は鉄筋コンクリート構造物の構造性能に大きな影響を及ぼすことが知られている．しかし，破壊モードの変化を考慮に入れた，鉄筋腐食量と構造性能の関係は，定量的に解明されていない．本研究は塩害劣化による鉄筋断面減少を電食実験によって再現し，載荷実験を行い，塩害劣化による RC 梁の鉄筋断面減少と構造性能の低下の関係を定量的に評価した．同時に，破壊モードの変化する時点の鉄筋腐食量を限界鉄筋腐食量 Δ_{lim} と定義し，求めた．

2. 電食による実験

本研究で作成した小型RC梁試験体を図1に示す．引張鉄筋にはD10，圧縮側にはアクリル棒，せん断補強筋にはD6@50 mmを使用した．電食実験の方法と鉄筋腐食の範囲を図2に示す．電食実験では対極として，試験体底部に幅200 mmのステンレス板を設置した．ステンレス板と試験体の間にはスポンジを設置し，海水をスポンジ中央部まで浸すことで，スポンジから試験体高さの半分程度までを塩水が浸透すると考えた．腐食させる対象を試験体中央から左右に150 mmの範囲の引張鉄筋と仮定し，せん断補強筋と交わる部分には，絶縁処理をした．

載荷実験後，はつり出した鉄筋の錆取を行い，鉄筋の質量と長さを計測する．腐食後の鉄筋質量と鉄筋が健全だった場合の質量を計算によって求め，その差を鉄筋腐食量とする．試験体1体につき，5本の鉄筋を取り出しそれぞれの平均断面減少率 Δ_e を算出した．計測した5本のうち最大のものを試験体の平均断面減少率 Δ_e とし，構造性能と鉄筋腐食量の関係の評価に使用した．

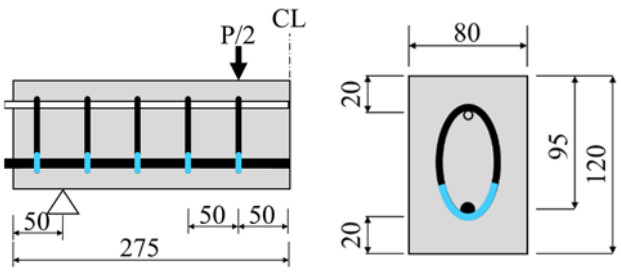

図1　試験体概要図

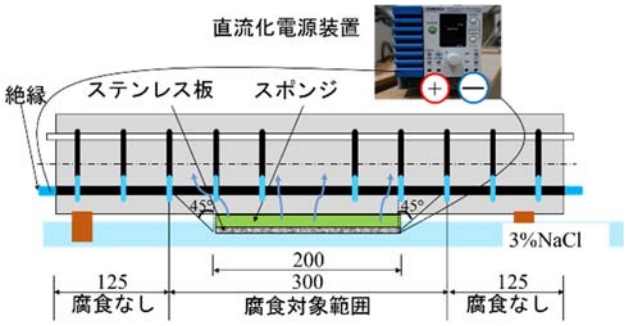

図2　電食実験の方法と鉄筋腐食範囲

3. 鉄筋腐食量と構造性能低下の関係

平均断面減少率 Δ_e と終局耐力の低下率 P_{ui}/P_{u0} の関係を図3に示す．載荷実験による試験体の破壊モードは，平均断面減少率 Δ_e が20％ まではコンクリートの圧壊となった．20~30％ では，コンクリートの圧壊直後鉄筋の破断となり，破壊モードは変化する．その時点の平均断面減少率 Δ_e は徐々に低下する．終局耐力の低下率 P_{ui}/P_{u0} は平均断面減少率 Δ_e が10％ までは一定となり，それ以降指数的に減少するとして，回帰式を求めた．平均断面減少率 Δ_e が10％ までの試験体の終局耐力の平均値を基準値 P_{u0} とし，P_{ui} は各試験体の終局耐力である．P_{ui}/P_{u0} を終局耐力の低下率と定義した．平均断面減少率 Δ_e と終局耐力の低下率 P_{ui}/P_{u0} の関係を式(1)に示す．

$$\begin{aligned} &P_{ui}/P_{u0}=1.0 && \Delta e \leqq 10\,\% \\ &P_{ui}/P_{u0}=1.63\cdot(1-e^{-0.01\,\Delta e})+1.09 && \Delta e > 10\,\% \end{aligned} \quad (1)$$

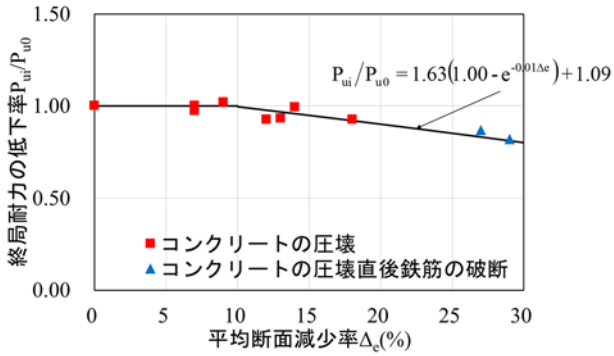

図3　平均断面減少率 Δ_e と終局耐力の低下率 P_{ui}/P_{u0}

平均断面減少率 Δ_e と終局変位の低下率 δ_{ui}/δ_{u0} の関係を図4に示す．平均断面減少率 Δ_e が30％ までの範囲では，終局変位の低下率 δ_{ui}/δ_{u0} は一定となる．終局変位の低下率 δ_{ui}/δ_{u0} は終局耐力の低下率 P_{ui}/P_{u0}

よりも，鉄筋断面減少に対する感度が低くなった．

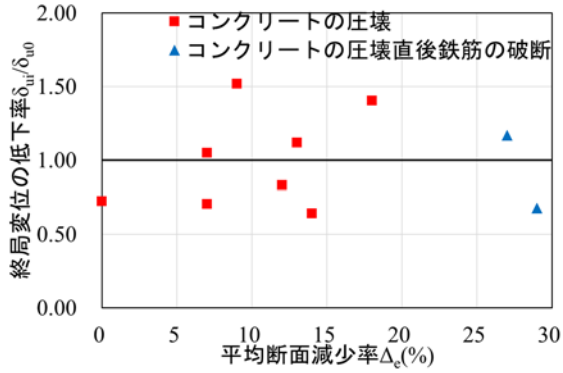

図 4　平均断面減少率 Δ_e と終局耐力の低下率 δ_{ui}/δ_{u0}

4.　限界鉄筋腐食量

鉄筋の破断で破壊した試験体の載荷実験の写真を図 5 に示す. コンクリートの圧壊による破壊と比べ，鉄筋のじん性が低下しているため，ぜい性的に破壊しており，非常に危険な破壊形状である．破壊モードがコンクリートの圧壊から鉄筋の破断へと変化する時の鉄筋腐食量を限界鉄筋腐食量 Δ_{lim} と定義する．破壊モードは, 終局時のコンクリートのひずみ ε_c が，コンクリートの終局ひずみ ε_{cu}=3500μ 未満であれば，鉄筋の破断で破壊すると判定した．

限界鉄筋腐食量 Δ_{lim} を理論的に求めるには，鉄筋の破断で破壊する場合の曲げ耐力 M_{su} とコンクリートの圧壊で破壊する場合の曲げ耐力 M_{cu} を求める必要がある．コンクリートの圧壊が起こる前に，鉄筋の破断によって破壊する場合の曲げ耐力 M_{su} の算定方法を図 6 に示す. 鉄筋が破断ひずみ ε_{su} に達しているが, コンクリートは終局ひずみ ε_{cu} に達しておらず，等価応力ブロックが適用できないため，コンクリートの圧縮力は数値解析的手法により求める．腐食後の鉄筋の引張力は，腐食後の鉄筋断面積 A_s'に，降伏強度 f_y=295 N/mm^2 を掛けることで求める．破断時の鉄筋ひずみ ε_{su} の求め方を図 7 に示す. コンクリートは剛体であると仮定する．載荷点の真下に曲げひび割れが生じ，鉄筋に応力が集中し，破断すると考える．曲げひび割れ発生部の変位 δ'は，応力集中による破断伸び δ，弾性変形による弾性伸び δ_1，及び塑性変形による塑性伸び δ_2 が含まれている．曲げひび割れ発生部の全鉄筋の伸び量 δ を終局時の梁の鉛直変位 δ_u との関係から幾何学的に求め，両側それぞれの伸び量を除することで応力集中により破断した鉄筋の破断伸び δ を求めた．求めた鉄筋の破断伸び δ を，標点距離の基準である 8.0D で除し破断時の鉄筋の破断ひずみ ε_{su} を求めた．

コンクリート圧壊で破壊する場合の曲げ耐力 M_{cu} の計算では, 試験体が小型で単鉄筋であることから，コンクリート圧壊時には鉄筋はひずみ硬化による応力の増加が生じているため，鉄筋強度には引張強度である f_u=520 N/mm^2 を使用した．

終局曲げ耐力 M_u と鉄筋腐食量の関係を図 8 に示す．破壊モードがコンクリートの圧壊から鉄筋の破断へと変化する限界鉄筋腐食量 Δ_{lim} は 25.0 % となり，理論値は実験結果と一致した．

図 5　鉄筋の破断で破壊した試験体

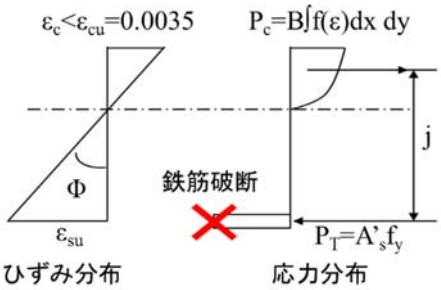

図 6　鉄筋の破断時の曲げ耐力 Msu の算定

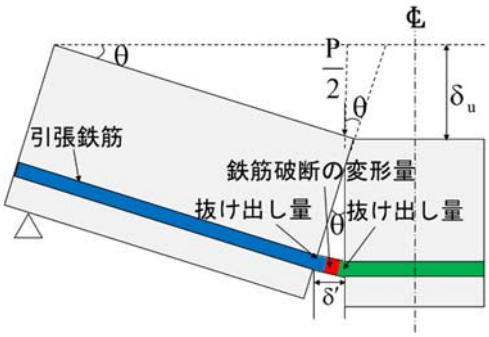

図 7　鉄筋の破断時の鉄筋ひずみ ε_{su} の求め方

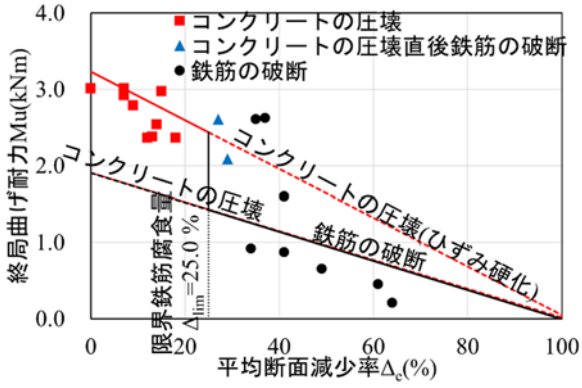

図 8　平均断面減少率 Δe と終局曲げ耐力 Mu の関係