NDT と FEM の併用による鉄筋腐食によりひび割れが生じた RC はり部材の曲げ耐力推定手法

大阪大学大学院工学研究科　学生会員　○木下真一　正会員　鎌田敏郎
大阪大学大学院工学研究科　正会員　内田慎哉　正会員　大西弘志

１．はじめに

本研究では，まず，電食試験によりかぶりコンクリート表面に腐食ひび割れが生じた RC はり供試体を対象に，以下の異なる 2 つの手法（手法 I および手法 II）を適用した．すなわち，前者の手法 I は「目視によるひび割れ幅の測定結果から終局強度理論に準じて曲げ耐力を推定する手法」である．一方，後者の手法 II は，「目視および分極抵抗法による非破壊試験結果から FEM 解析を用いて曲げ耐力を推定する手法」である．続いて，各手法の適用性を把握するため，推定した曲げ耐力と載荷試験により実測した曲げ耐力とをそれぞれ比較した．

２．目視によるひび割れ幅の測定結果から終局強度理論に準じて曲げ耐力を推定する手法

２．１　実験概要

（１）供試体

図１に供試体の概要[1)]を示す．供試体を作製後，電食試験により供試体内部の鉄筋の腐食促進を行った．

（２）非破壊試験

クラックスケールを用いて目視による腐食ひび割れ幅の測定を行った．ひび割れ幅の測定位置は，主筋とスターラップの交差部およびでスターラップ間の 3 点とした．したがって，測定間隔は約 25mm である．

（３）曲げ載荷試験

載荷スパンを 1260mm とした 4 点曲げ載荷試験により実際の曲げ耐力を把握した．載荷試験時の測定項目は，載荷荷重，載荷点変位，支点変位およびスパン中央上縁コンクリートのひずみである．

２．２　鉄筋の腐食量推定

供試体内部の鉄筋の腐食量を推定するため，既往の研究で提案されている腐食ひび割れ幅から鉄筋の腐食量を推定する式[2)]を用いた．次式に示す．

$$m_c = \frac{\rho_s}{\pi(\gamma-1)}\left[\alpha_0\beta_0\frac{0.22\left\{(2c+d)^2+d^2\right\}}{E_c(c+d)}f_c'^{2/3}+\alpha_1\beta_1\frac{(c+d)}{(5c+3d)}w\right] \quad (1)$$

ここで，m_c：鉄筋の腐食量(mg/mm^2)，ρ_s：鉄の密度（7.85mg/mm^3），γ：腐食生成物の体積膨張率，c：かぶり（mm），d：鉄筋直径（mm），E_c：コンクリートのヤング率(N/mm^2)，f'_c：コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)，w：腐食ひび割れ幅（mm），α_0：腐食ひび割れ発生時点のかぶりと鉄筋直径に関する補正係数，β_0：ひび割れ発生時点のコンクリートの圧縮強度に関する補正係数，α_1：腐食ひび割れ発生後のかぶりと鉄筋直径に関する補正係数，β_1：ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度に関する補正係数である．

２．３　手法 I による曲げ耐力推定結果

クラックスケールを用いて目視により測定したひび割れ幅の最大値から式(1)により鉄筋の腐食量を算出した．算出した鉄筋の腐食量を鉄筋の断面積に換算し，限界状態設計法の終局強度理論により曲げ耐力を推定した．算出した推定値，載荷試験により得られた実測値（最大荷重）および両者の比を**表１**に併せて示す．

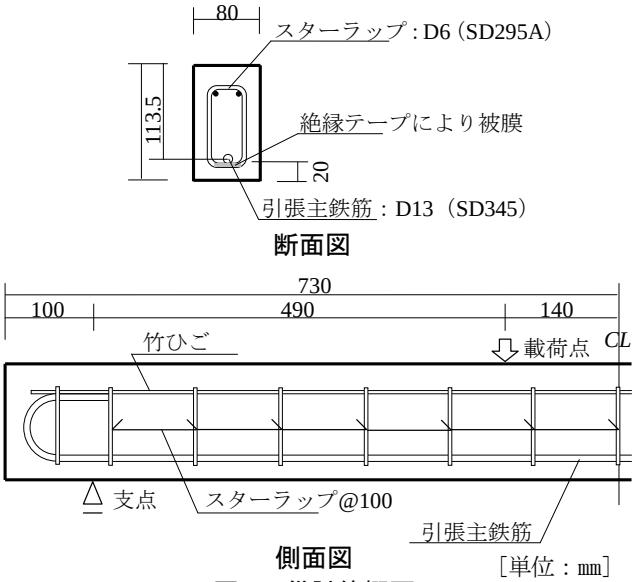

図１　供試体概要

表１　手法 I による推定値と実測値

	曲げ耐力(kN)
推定値	22.8
実測値	27.1
推定値/実測値	0.84

キーワード　鉄筋コンクリート，曲げ耐力，非破壊試験，分極抵抗法，FEM 解析
連絡先　〒565-0871　大阪府吹田市山田丘 2-1 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 TEL06-6879-7618

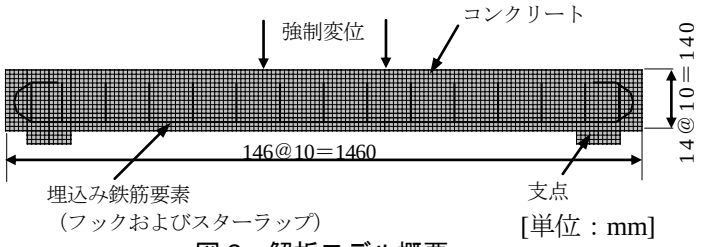

図２　解析モデル概要

３．目視および分極抵抗法による非破壊試験結果から FEM 解析を用いて曲げ耐力を推定する手法

３．１　実験概要

（１）供試体および曲げ載荷試験

供試体（**図１**参照）および曲げ載荷試験の概要は**２章**と同じである．

（２）非破壊試験

腐食ひび割れが生じている部分ではクラックスケールを用いて目視によるひび割れ幅測定を，ひび割れが生じていない部分では分極抵抗法をそれぞれ適用した．ひび割れ幅と分極抵抗の測定位置および測定間隔は，**２章**のひび割れ幅の測定の場合と同じである．

３．２　鉄筋の腐食量推定

腐食ひび割れが発生している箇所では，式(1)を用いて，鉄筋の腐食量を推定した．ひび割れが生じていない部分では，分極抵抗法により測定した分極抵抗とコンクリートはつり後のノギスによる鉄筋の実測値との相関関係から，腐食後の鉄筋径を推定することとした．相関関係から算出した回帰式を次式に示す．

$$D = 12.44 + 0.00239 R_{ct} \qquad (2)$$

ここで，D：ノギスにより実測した鉄筋直径（mm），R_{ct}：分極抵抗（$\mathrm{k\Omega cm^2}$）である．

３．３　FEM 解析概要

解析モデルの概要を**図２**に示す．各非破壊試験から推定した鉄筋径は，解析モデルの鉄筋要素（要素長さ50mm）に反映させた．載荷位置および支点位置は，曲げ載荷試験と同じである．

３．４　手法Ⅱによる曲げ耐力推定結果

図３に解析および実験から得られた荷重–変位曲線を併せて示す．**表２**に曲げ耐力の推定値，曲げ載荷試験により把握した実測値および両者の比を示す．

４．手法Ⅰおよび手法Ⅱによる曲げ耐力の推定結果と載荷試験結果の比較

手法Ⅰおよび手法Ⅱにより推定した曲げ耐力と，曲げ載荷試験により把握した実測の曲げ耐力をそれぞれ比較した結果，両者とも概ね近い値となることが把握できた．また，手法ⅠとIIの比較では，手法Ⅱにより推定した曲げ耐力の方が，実測値により近い値となった．これは，鉄筋の腐食の不均一性を考慮したためであると考えられる．

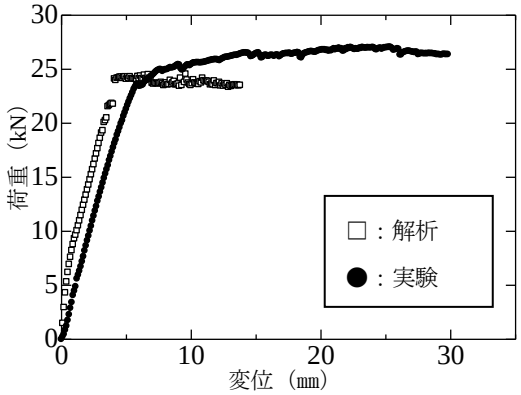

図３　荷重-変位曲線

表２　手法Ⅱによる推定値と実測値

	曲げ耐力(kN)
推定値	24.6
実測値	27.1
推定値/実測値	0.91

５．まとめ

本研究では，電食試験によりかぶりコンクリート表面に腐食ひび割れが生じたRCはり供試体を対象に，以下の2種類の手法から曲げ耐力の推定を行った．手法Iでは，目視によるひび割れ幅の測定結果の最大値から終局強度理論に準じて曲げ耐力の推定を試みた．一方，手法IIでは，ひび割れ発生の有無に応じて，ひび割れ幅の測定および分極抵抗法を併用し，FEM 解析により曲げ耐力の推定を行った．その結果，いずれの手法においても，かぶりコンクリートに腐食ひび割れが生じたRCはり供試体の曲げ耐力を概ね推定できることが明らかとなった．

参考文献

1） 土木学会 コンクリート技術シリーズ85：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，pp.10-11，2009

2） 関　博ら：鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.161-171，2001.2

謝辞

本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）21360206）を受けて行ったものである．ここに記して謝意を表する．