

川田工業(株) 正会員 ○ 橋 吉宏

川田工業(株) 正会員 前田 研一

金沢大学工学部 正会員 梶川 康男

1. まえがき コンクリート構造物中での鉄筋腐食が最近大きな問題の一つとして取り上げられるようになり、構造物の安全性を評価する上で、その力学的挙動を追跡し得る解析手法の確立が望まれている。本研究は、このような観点から、腐食鉄筋を有するコンクリート構造物の解析手法の開発を試みるものであり、解析理論としては、錆により変化する材料の特性をパラメトリックに解析できる利点のある有限要素法を適用するものである。ここでは、本解析手法の概要を述べるとともに、解析例として文献¹⁾に詳細を報告した腐食鉄筋単ばりの載荷試験結果と対比させた数値解析を行い、妥当性を検討する。

2. 鉄筋とコンクリートの付着モデル

錆による付着劣化を表現するにはコンクリートと鉄筋との付着モデルが重要な役割を果たし、付着モデルとして節点間で力の伝達を行うリンク要素(図-1(a))が、コンクリート構造物に対して一般に適用されている。他方、岩盤などの解析に適用されているものにインターフェイス要素(図-1(b))があり、形状マトリックスを定義していることから、リンク要素のように要素剛性の決定において等価バネの影響長さを考えなくてもよく、また、要素剛性も応力-ひずみ関係で取り扱われるので、その構成関係も論ずることができるという利点をもっている。著者らは前に、インターフェイス要素の一種である Goodman²⁾らの要素を骨材とモルタルとの付着要素に適用して、コンクリート構造モデルを解析し実験結果と対比させて良好な結果を得ている。そこで、本解析でも錆による付着劣化を表現するために、Goodman²⁾らの付着要素(仮要素厚 $t=0.2\text{ cm}$)を適用するとした。

ここに、適用した Goodman²⁾らの付着要素はコンクリート、鉄筋に用いる定ひずみ三角形要素に適合するものであり、応力成分としてせん断応力成分、直応力成分およびモーメント成分を取り扱っているが、ここでは、前二者のみを取り扱うこととした。すなわち、付着要素における剛性は次式で具体的に表わされることになる。

$$\begin{Bmatrix} \tau \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s & 0 \\ 0 & K_n \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \gamma \\ \varepsilon \end{Bmatrix} \quad \text{----- (1)}$$

したがって、上式から、 K_n に関しては完全付着に相当するバネ剛性の値が用いられるが、 K_s に関しては腐食日数に応じた値が決定される必要があることは明らかである。

3. 付着要素の剛性の評価法

付着要素の剛性すなわち上述の K_s を評価する方法として、従来は引き抜き法による付着試験の結果得られるマクロ的な付着応力-変位関係から値を算定するのが一般的である。しかしながら、付着試験から得られる付着応力-ひずみ関係がそのまま付着要素の応力-ひずみ関係を正しく評価しているとは、必ずしも言えない。そこで、本研究では、引き抜き法による付着試験結果の有限要素法による逆解析から付着剛性を決定する手法を考えた。ここに、破壊規準としては、図-2に示すように、せん断応力 τ が付着強度 τ_u (引き抜き試験における最大耐力力を鉄筋の周面積で除したもの) に到達すると破壊を起すものとした。このような仮定の基準を適用しても、実用上大きな問題はないと思われる。

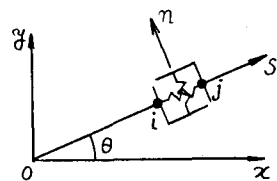


図-1 (a) リンク要素

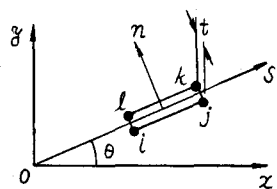
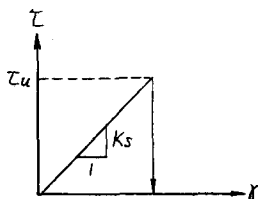
図-1 (b) インターフェイス要素 (Goodman²⁾らの要素)

図-2 付着応力-ひずみ関係

4. 材料のモデル化および初期応力状態の表現 材料のモデル化として、コンクリートの構成式には塑性ポテンシャルを降伏関数とみなした Associated Flow Rule の仮定による Chen ら⁴⁾ のモデルを用いることとし、破壊規準もそれに準じさせた。また、クラックに対しては、クラックの破壊規準に到達した要素内に連続的なクラックが生じると仮定し、構造物の全体的な挙動傾向を追跡するのに適している Smeared Cracking Model を用いることとした。他方、鉄筋は Von-Mises 材料とした。

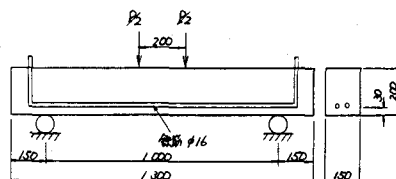
さらに、負荷前の鑄の膨張圧によって発生する初期応力は、鉄筋に作用する外力としてひずみに対する等価節点力で与えることにより表現するとした。ただし、前出の文献¹⁾の実験で観察された初期の曲げ剛性の上昇は初期応力の単なる導入のみでは説明できないことから、負荷初期の段階で膨張圧の一部がぬけて応力が解放されていくものとして解析を行なうこととした。

5. 模型試験結果との対比による解析手法の妥当性の検討

(1) 解析対象 対象とした構造物は前出の文献(1)における丸鋼の腐食鉄筋を有する単純ばり模型であり、種々の電食日数に対応して荷重試験が実施されたものである。その主要な諸元を図-6に示す。ここに、有限要素分割は、節点数233、コンクリート要素数308とした。

(2) 付着要素 付着要素は鉄筋とコンクリートとの界面に挿入しているが、折曲げ鉄筋部分については完全固着とした。

付着要素のせん断方向のバネ剛性 K_3 は 3 章の評価法に従って、図 4、5 に示す鉄筋はり模型と全く同様の条件の供試体の付着試験とその結果を用い、図 6 に示す要素分割で逆解析を行うことによって算定された。各電食日数に対応する算定結果を、 τ_u とともに図 1 に示す。



コンクリート圧縮強度	28.0	kg/cm ²
コンクリート割裂強度	2.5	kg/cm ²
初期接線弾性係数	24000	kg/cm ²
ポアソン比	0.17	
鉄筋降伏強度	330	kg/cm ²
鉄筋ヤング率	20000	kg/cm ²

图-3 解析对象

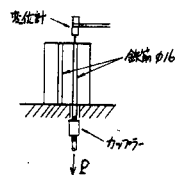
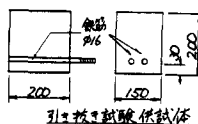


図-4 付着試験の概要

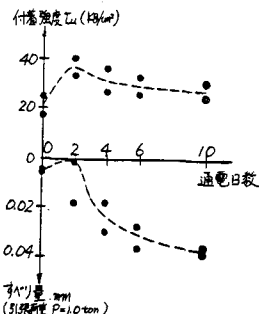


図-5 引き抜き試験結果

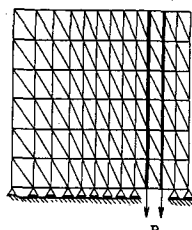


図-6 要素分割

表-1 逆解析結果

通電時間	Ks (kg/㎡)	τu (kg/㎡)
非腐食	5 000	2.2
2日間	2 500	3.7
4日間	1 000	3.8
6日間	800	3.1
10日間	600	2.9

(3) 解析結果とその考察 解析結果の一部として、非腐食の K_S を用いた場合のクラックパターンを図-7(a)に、10日間電食に対応する K_S を用いた場合のそれを図-7(b)に示す。これらの結果より、付着剛性が低くなるに従ってひびわれが中央部に集中する傾向があることがわかり、文献1)の試験結果でも例えば10日間電食の腐食鉄筋においてスパン中央付近の曲げひびわれが卓越していたことから、同様の傾向であるといえた。したがって、本解析手法が付着剛性の変化によるクラックパターンの変化などをある程度追跡し得ることは十分に予測できた。しかしながら、耐力力を数値的に把握できるまでは至れず、今後、解析手法に適用した多くの仮定をさらに検討する必要があるといえた。

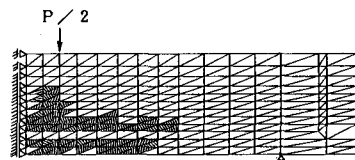


図-7 (a) クラックパターン
(非腐食、 $P=4.0 \text{ ton}$)

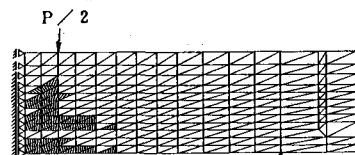


図-7 (b) クラックパターン
(10日間通電, $P=4.0 \text{ ton}$)

参考文献) 1) 作田, 福, 花川 “金属腐食による力学的性質の劣化” 第4回全国金属腐食シンポジウム, 1985 2) 藤村, 橘, 田 “層状材料の平面応力を用いたコンクリートの弾性率について”, 土木学会論文誌, 35号, 1985, 3) Goodman, R.E., Taylor, Bekke “A Model for the Mechanics of Jointed Rock” Proc. A.S.C.E. Vol. 94, No. 3M3, 1968, 4) Chen, W.F. “Plasticity in Reinforced Concrete”, Mc-graw Hill, 1982