

初期亀裂を有する曲げ加工部の強度低下に関する解析的研究

香川大学大学院	学生会員	○三浦 良輔
(株) 四国総合研究所	正会員	横田 優
香川大学工学部	正会員	吉田 秀典
香川大学工学部	正会員	松島 学

1. はじめに

現在、アルカリ骨材反応（以下 ASR と呼ぶ）によるコンクリートの膨張圧により、鉄筋曲げ加工部の一部で、破断事例が複数報告されている。鉄筋曲げ加工部の損傷メカニズムは、破断事例が報告された現場データからの知見に加え、実験的、解析的研究により徐々に解明されつつあり、曲げ加工部内側に発生した初期亀裂と ASR の膨張力による曲戻力の相互作用が主要因と考えられている。

本研究は、あらかじめ曲げ加工部内側に初期亀裂を有する数値解析モデルを作成し、初期亀裂に伴う強度低下を 2 次元弾塑性有限要素解析により評価した。

2. 数値解析モデル

鉄筋曲げ加工部内側の初期亀裂は、曲げ加工時、水素脆化による割れ、腐食による孔食のいずれかにより発生すると報告がある。発生した初期亀裂に ASR の膨張力による曲戻力が加わり、亀裂近傍に応力集中が生じることで、亀裂の進展または破断に至ると考えられている。

本研究は、鉄筋曲げ加工部の初期亀裂発生メカニズムを検討するのではなく、亀裂発生後、亀裂に伴う曲げ加工部の強度低下に着目した。数値解析モデルは、曲げ加工後の鉄筋を想定し、初期亀裂発生に伴う応力解放により曲げ加工部における残留応力は 0、曲げ加工に伴う材質変化はないと仮定した。数値解析モデルを図-1、初期亀裂モデルを図-2、材料特性を表-1に示す。初期亀裂モデルは曲げ加工部中心に設けた。破断事例の報告が多いスターラップに着目し、鉄筋径は D16 とした。曲げ内半径 r はコンクリート標準示方書より $r=2\phi$ 、曲げ加工直線部 l はコンクリートと鉄筋の定着を考慮し $l=3\phi$ 、 5ϕ の 2 種とした（ここで ϕ ：鉄筋径）。図-1 示すように ASR の膨張力による曲戻力は、圧力荷重 q を鉄筋軸方向に対して垂直に与えることで再現し、一定値とした。鉄筋の構成則は、降伏後の接

線勾配を設けたバイリニア型とし、引張強度到達後の応力緩和は考慮していない。本研究では、曲げ加工部に発生する応力が、引張強度に達する時点を破断と定義した。亀裂進展の実挙動は、降伏強度と引張強度の範囲に存在する想定している。したがって、一般的に鉄筋の構成則に用いられる接線勾配 1/1000 ではなく、

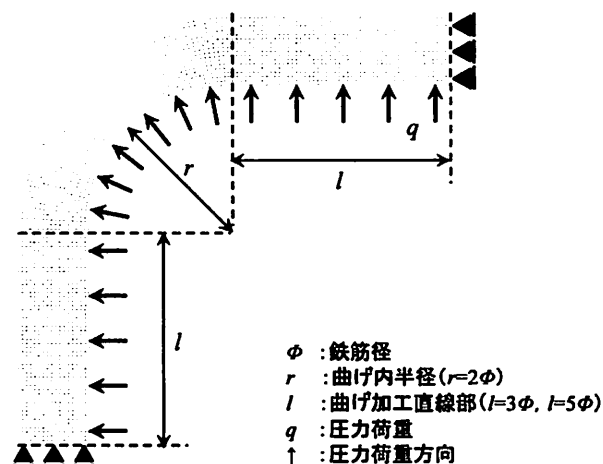


図-1 数値解析モデル

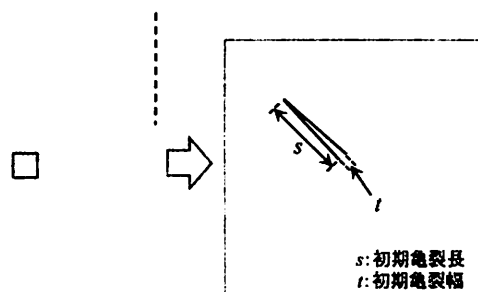


図-2 初期亀裂モデル

表-1 材料特性

項目	設定条件
呼び名	D16
想定鉄筋	SD345
降伏強度 f_y (N/mm ²)	345
引張強度 f_u (N/mm ²)	490
弾性係数 E_s (N/mm ²)	200000
鉄筋降伏後の接線勾配 E_s' (N/mm ²)	731.1
ポアソン比 μ	0.3

独自に接線勾配を設定した。

4. 解析パラメータ

曲げ加工部内側に発生する初期亀裂は、製造過程、鉄筋の化学的、機械的性質等の影響を受けるため千差万別である。実在する橋脚よりはつり出された鉄筋曲げ加工部の初期亀裂長を基準値として設定した（図-3）。この鉄筋は、ASRの劣化橋脚より採取されたものであり、ASRによる膨張力の影響に加え環境条件等を考慮した結果、初期亀裂長の最大値であると推測し、最大初期亀裂長を1750 μm とした。これを基に、初期亀裂長を500 μm 、1000 μm と設定し、初期亀裂を有する数値解析モデルを3体、強度評価のため初期亀裂のない数値解析モデルを1体、計4体作成した。初期亀裂条件は表-2の通りである。なお、初期亀裂幅 t は初期亀裂長の1/10である。

4. 解析結果

無次元化した各強度比較の結果、相関係数 R 、関数式を図-4、図-5に示す。曲げ加工直線部 $l=3\phi$ 、 5ϕ 共に強度低下が同程度であるので、相関係数及び関数式は $l=3\phi$ の結果のみを記載している。降伏強度の評価はVon Misesの降伏条件を採用していることから相当応力により、引張強度の評価は引張応力（第1主応力）により行った。縦軸は各初期亀裂Typeにおける強度到達時の圧力荷重を、最大強度を有するType Aの圧力荷重で除した圧力荷重比 $P_n/P_{\text{Type A}}$ 、横軸は初期亀裂長を鉄筋径で除した初期亀裂比 s/ϕ である。降伏強度到達時は、初期亀裂を有する場合、初期亀裂長の寸法増加に伴い、急激な強度低下が生じている。一方、引張強度到達時は、降伏強度到達時に比べ亀裂近傍で応力再配分が起こり、広範囲に渡り塑性化するため低下率が低い。また、圧力荷重比と初期亀裂比の相関係数は高いことから、強度低下に対して支配的なパラメータは初期亀裂長であると言える。次に、各強度と初期亀裂の関係性は指数関数であると考え、最小二乗法を用いて定式化を試みた。各強度共に指数関数式が解析結果に近似する曲線を示している。

5. まとめ

鉄筋曲げ加工部は、曲げ加工に伴い塑性化にすることから、初期亀裂を有する場合脆性的な破壊挙動を呈する。そのため、実現象において、引張強度よりも降伏強度に近い応力で亀裂進展が生じると考えられる。

曲げ加工部内側に初期亀裂長が500 μm 発生したとすると（ s/ϕ において約0.03時）、初期亀裂を有さない場合に比べ4割以上強度が低下する。したがって、初期亀裂の有無は、構造物の耐力を左右しかねない事象の一つであると推測できる。

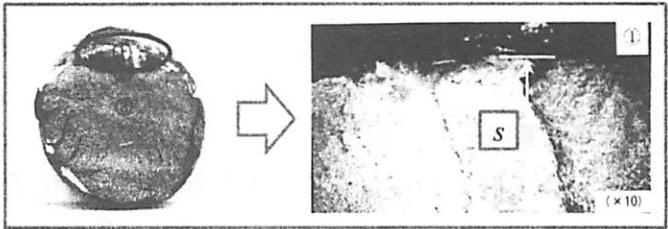


図-3 初期亀裂現場データ

表-2 初期亀裂設定条件

初期亀裂 Type	初期亀裂長 s (μm)	初期亀裂幅 t (μm)
Type A	0	0
Type B	500	50
Type C	1000	100
Type D	1750	175

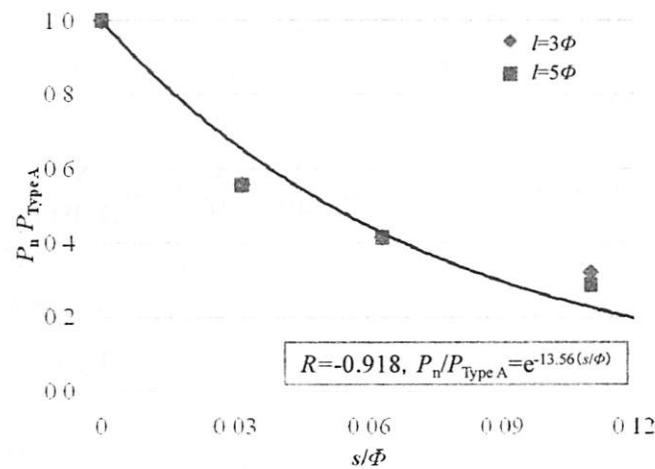


図-4 降伏応力到達時の強度比較

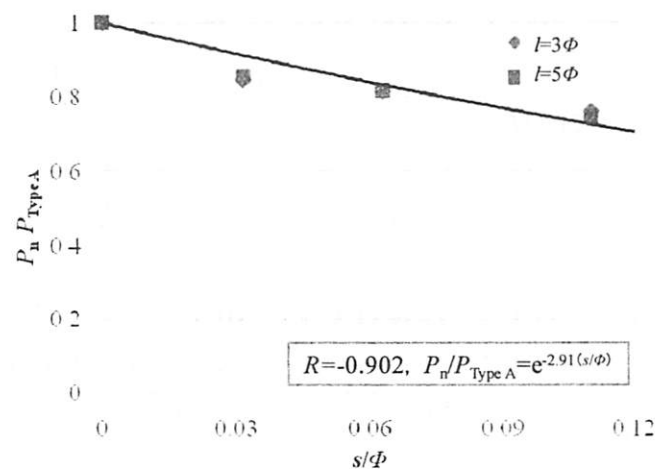


図-5 引張応力到達時の強度比較