

アルカリ骨材反応による鉄筋損傷の原因究明に関する検討報告

阪神高速道路公団	正会員	○佐々木 一則
阪神高速道路公団	正会員	熊澤 美早
神鋼鋼線工業(株)		五十嵐 弘行

はじめに

近年、アルカリ骨材反応による劣化の進行に伴い、鉄筋の曲げ加工部等において破断や亀裂などの損傷が生じる事例が報告されている。鉄筋損傷原因の究明に関しては、これまでの検討において、曲げ加工およびひずみ時効の影響を確認するための室内試験結果や損傷橋脚から採取した鉄筋の詳細調査結果などを報告している。本報告では、鉄筋損傷と腐食環境要因の関係の検討として、低ひずみ速度引張試験(SSRT=Slow Strain Rate Test)を行い、破面の状態を損傷鉄筋と比較するとともに、鉄筋の節形状の違いによる破断の感受性の検討として、異形鉄筋の曲げ加工による節根元部のひずみの状況を確認するために、実際の曲げ加工をFEM解析により再現して、比較検討を行ったので報告する。

1. 鉄筋損傷と腐食環境要因の関係の検討（低ひずみ速度引張試験）

鉄筋損傷と腐食環境要因との関係を確認するために、アルカリ骨材反応による膨張力(鉄筋に非常にゆっくりとした曲げ戻し力がかかる状態)をイメージして、低ひずみ速度引張試験を行い、破断面の状態を損傷鉄筋と比較した。試験サンプルはSD295A, D10を使用し、処理条件は 曲げ半径 1d (d = 鉄筋の直径, 半径は内法寸法)の曲げ加工, 1d 曲げ + 時効処理 (150 × 10min = ひずみ時効の影響を模擬), 1d 曲げ + 時効処理 + 酸洗い (15% HCl × 30min = 拡散性水素の影響(水素脆性))とした。試験速度は 10, 30, 50 μm/min の3レベルとし、処理条件毎に1本の試験を行った。

試験結果は、30, 50 μm/min において、曲げ加工のみでは引張強度および破断時間に違いがあったが、時効処理および時効 + 酸洗い処理を行ったものは、引張強度および破断時間は同様の傾向を示した。(10 μm/min については、12h で破断しなかったため試験を打ち切った。)

電子顕微鏡で破面観察を行った結果を写真1, 2に示す。ほとんどがディンプル状の延性破面を示しているが、酸洗いを施したサンプルの起点部(写真2)は疑へき開破面を示し、実橋の起点部破面に見られるような様相を示した。実橋の破断鉄筋がほぼ全面にわたってへき開破面(写真3)であったことと比較すると、今回の結果は、試験速度の影響も考えられるが、損傷は腐食環境も要因となることをうかがわせる結果となった。

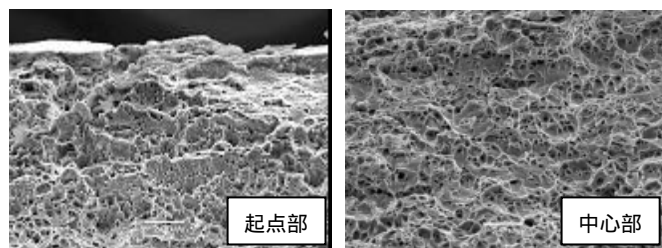


写真1 破面観察結果(30 μm/min 曲げ加工のみ)

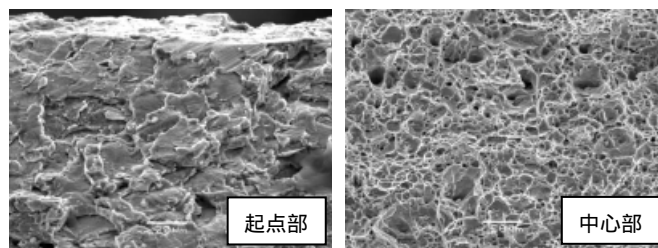


写真2 破面観察結果(30 μm/min 酸洗い)

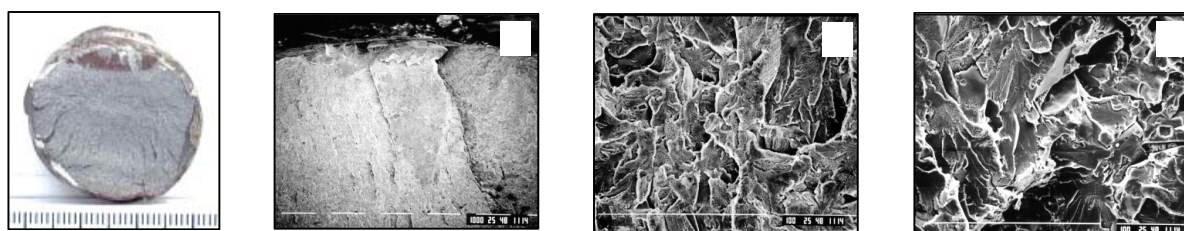


写真3 実橋損傷鉄筋破面観察結果の一例

キーワード アルカリ骨材反応, 鉄筋損傷, へき開破面, 低ひずみ速度引張試験

連絡先 〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3 (大阪センタービル内) 阪神高速道路公団 TEL 06-6282-8121

2. 鉄筋の節形状の違いによる破断の感受性の検討

異形鉄筋の曲げ加工による節根元部のひずみの状況を確認するために、実際の曲げ加工を FEM 解析において再現して、旧形状と現行形状による違いを比較検討した。検討に際しては、節無し鉄筋における状況を確認するとともに、現行市販品の鉄筋（D16）を曲げ加工（1.0d, 1.5d, 1.9d, 2.5d）してクラックの発生状況を確認した。

曲げ加工の FEM 解析は、節無し鉄筋と竹節状鉄筋（現行形状、旧形状）（写真 4 参照）をモデル化して、曲げ半径 1.1d, 1.5d, 2.0d, 2.3d の 4 種類について、ベンダーによる曲げ加工を再現して解析した。材料モデルは、ヤング率 210000MPa, ボアソン比 0.3, 降伏応力 305MPa とし、解析プログラムは ABAQUS/STANDARD Ver6.3 を使用した。

鉄筋は曲げ加工により大変形(非線形)となることから、ひずみ量の評価は多軸応力状態で与えられたひずみが、単軸応力状態でどのくらいのひずみ量に相当するかを示す相当塑性ひずみ(equivalent strain)により評価することとした。

各節形状の鉄筋の最大相当塑性ひずみ量と曲げ半径との関係をグラフ化したものを図 1 に示す。現行形状の鉄筋の曲げ加工試験で、1.0d でクラックが発生し、1.5d で発生しなかった。1.0d 曲げのクラック発生位置は解析で最も相当塑性ひずみが大きく現れている位置と一致していた。また、1.5d 曲げの実験ではクラックが生じていないことから、当該検討で使用した現行形状鉄筋のクラック発生限界は 1.0d と 1.5d の間に存在すると思われる。仮にひずみ量が 1.0 以上のときクラックが発生すると仮定すると、旧形状鉄筋の場合、現行の曲げ加工半径の基準である 2.0d 曲げの場合でも 1.24 のひずみ量を示すことから、クラック発生の可能性が大きいことがわかる。逆に、現行形状の場合では、1.5d では 0.91 のひずみ量となりクラック発生の可能性は低くなり、現行の曲げ半径の基準である 2.0d 曲げでは 0.89 のひずみ量でさらに安全側の値となる。

以上のことより、鉄筋破断の要因のひとつとして、曲げ加工による節根元部のクラック発生を考えると、旧形状の鉄筋では破断の感受性が高まっていることがうかがえる。なお、解析では、鉄筋とベンダーとは理想的に接触した状態で曲げ加工を行うため、鉄筋とベンダーダイスとのクリアランスはなく、現実のベンダーの曲げ加工よりも厳しい条件であるため、数値的には少し大きめのひずみ量を示していることが考えられる。また、現行形状・旧形状とも 1 モデルの解析結果であるため、サンプル数を増やした検討が必要と考えている。

3. まとめ

低ひずみ速度引張試験(SSRT)により破断させた鉄筋の破面観察結果から、損傷は環境要因も影響することのうかがわせる結果となった。また、FEM 解析結果から節形状の違いは、節根元部に発生するひずみ量に影響し、旧形状の最大相当塑性ひずみ量は、現行形状のそれと比較すると 2～4 割程度増加することがわかった。

おわりに

当該検討を進めるにあたり、「ASR 橋脚の維持管理に関する検討委員会（委員長：京都大学大学院 宮川豊章教授）」においてご指導を賜りました。委員長はじめ関係各位に深く感謝の意を表します。

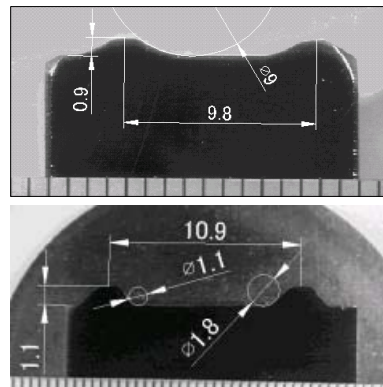


写真 4 鉄筋の節形状の違い
（上段：現行形状，下段：旧形状）

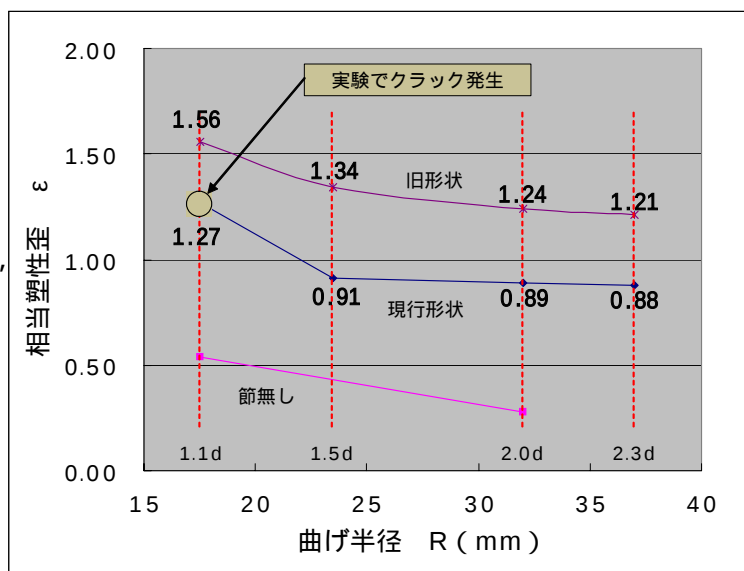


図 1 最大相当塑性ひずみ量と曲げ半径の関係