

## 開削トンネル部材における鉄筋の付着強度を弱めた場合の 損傷低減効果

川西 智浩<sup>1</sup>・日野 篤志<sup>2</sup>・室野 剛隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 (公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>2</sup>正会員 (株)ジェイアール総研エンジニアリング (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

<sup>3</sup>正会員 工博 (公財)鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

### 1. はじめに

橋梁・高架橋等の構造物は外力として慣性力が支配的であり、曲げ耐力が小さいほど変形量は大きくなる一方であるため、曲げ耐力を確保するために付着強度の高い異型鉄筋を使う必要がある。これに対し、開削トンネルは周囲を地盤に囲まれており、外力として地盤変位が主体であることから、開削トンネルが大きく変形しようとしても、周囲の地盤の変形量に限りがあるため、開削トンネルの変形が地盤により抑えられる可能性がある。一方、鉄筋の付着強度を弱めると、曲げ耐力は低下するが、変形性能が伸びてじん性率が高くなる、あるいはせん断力が低下してせん断破壊が発生しにくくなるといった効果が期待できる。したがって、開削トンネルにおいて鉄筋の付着強度を弱めた場合、地盤の影響で変形がある程度抑えられることから、付着強度を弱めることによる上記のメリットを生かすことができ、曲げやせん断による損傷が抑えられる可能性がある。そこで本研究では、開削トンネルにおいて鉄筋の付着強度を弱めた場合に地震時の部材損傷を低減させる効果について検討を行うこととする。

なお、代表的な付着強度の弱い鉄筋として丸鋼がある。特に昭和40年代頃までに建設された構造物には丸鋼が主鉄筋として使用されているものが多く、それらの構造物は現在でも使用されている。丸鋼を用いた鉄筋コンクリート構造物の性能評価については、これまでいくつかの研究が行われている。まず、部材の破壊形態に関する研究として、睦好<sup>ら</sup>は鉄筋コンクリート部材に丸鋼を用いることで主鉄筋の付着を低下させることにより、せん断破壊を防止で

きる場合があり、部材のじん性能が大幅に向上することを実験により示している。岡本<sup>ら</sup><sup>2)</sup>は、主鉄筋に丸鋼を用いたT型梁試験体について載荷試験を実施することにより、T型のスラブのせん断耐力が増加することを確認している。一方、丸鋼を用いた部材の曲げ変形特性に関する研究も行われており、澤松<sup>ら</sup><sup>3)</sup>は、丸鋼を用いたRC橋脚では鉄筋の抜け出しにより柱部のロッキングが生じやすいことを示している。また、松岡<sup>ら</sup><sup>4)</sup>は丸鋼の引き抜き試験を行い、その付着応力-すべり関係をモデル化するとともに、モデル化した付着応力-すべり関係を適用した有限要素解析を実施することにより、丸鋼を用いた部材の挙動を評価している。伊東<sup>ら</sup><sup>5)</sup>は、既存のRCラーメン高架橋の柱を模擬した多数の縮小モデルに対して正負交番載荷試験を実施し、その変形性能を把握している。

ただし、これらの研究は主に地上構造物の部材に丸鋼を用いる場合を想定しており、地中構造物の部材に丸鋼を用いた場合の耐震性能に関する研究は少ない。しかしながら、松岡<sup>ら</sup><sup>4)</sup>は丸鋼を用いた部材の挙動評価結果を元に、地中構造では丸鋼が有用な部材形式として一考に値する可能性があると述べており、古い開削トンネルにおける耐震診断等において、鉄筋の付着強度が弱い影響を考慮することにより、損傷を合理的に評価できる可能性がある。

そこで本研究では、付着強度の弱い鉄筋の代表として丸鋼を取り上げ、開削トンネル部材の鉄筋に異型鉄筋および丸鋼を用いた場合を想定し、降伏点（Y点）および最大耐力点（M点）の荷重・変位を変えて動的解析を実施する。そして、高架橋部材に丸鋼を使用した場合の動的解析もあわせて行い、両

表-1 異型鉄筋・丸鋼を用いたRC部材の変形性能の比較（文献5）に基づき設定）

|    |                  | 実験値／計算値 <sup>※1</sup>   |                         |         |
|----|------------------|-------------------------|-------------------------|---------|
|    |                  | 異型鉄筋のケース<br><文献5>,No.7> | 丸鋼のケース<br><文献5>,No.1>   | 丸鋼／異型鉄筋 |
| Y点 | 荷重 <sup>※2</sup> | 1.30<br>(=220kN/170kN)  | 1.00<br>(=150kN/150kN)  | 0.77    |
|    | 変位 <sup>※2</sup> | 1.00<br>{=(24/6)mm/4mm} | 1.21<br>{=(29/6)mm/4mm} | 1.21    |
| M点 | 荷重 <sup>※3</sup> | 1.13                    | 1.22                    | 0.93    |
|    | 変位 <sup>※2</sup> | 0.83<br>(=24mm/29mm)    | 1.21<br>(=29mm/24mm)    | 1.46    |

※1 実験値および計算値は、正負の平均値で整理した。

※2 実験値の荷重・変位は荷重－変位関係より読み取った（誤差を含んでいる）

※3 文献5)に示されている値を適用した。

者の損傷状況を比較することにより、開削トンネルにおいて鉄筋の付着強度を弱めた場合に地震時の部材損傷を低減させる効果について検証する。

## 2. 解析条件

### (1) 丸鋼を用いたRC部材の変形性能の設定

丸鋼を用いたRC部材の変形性能はこれまで定式化されておらず、丸鋼を用いたRC構造物の耐震性能を検討する場合には、異型鉄筋を用いたRC部材の変形性能を準用することが多い。一方、前述したように丸鋼を用いたRC部材の変形性能を把握する目的で、RC柱の正負交番載荷実験もいくつか行われている<sup>3)5)</sup>。そこでまず、RC部材の変形性能が異型鉄筋と丸鋼を用いた場合でどの程度変化するかを把握するため、異型鉄筋と丸鋼を用いたRC柱について鉄筋本数や鉄筋径等の条件を変化させた複数の試験体の載荷実験が行われている文献5)の結果を用いて、異型鉄筋および丸鋼を用いた場合のRC部材の変形特性を比較することとした。

まず、文献5)において、異型鉄筋を使用したNo.7と丸鋼を使用したNo.1の両試験体を比較すると、断面寸法やせん断スパン、軸方向鉄筋の鉄筋径・本数が同じであることから、この両試験体の荷重－変位関係を本検討に用いる。ただし、両試験体における材料強度が異なっているため、実験により得られた荷重－変位関係を直接比較することができない。一方、両試験体における材料強度を用いて、鉄筋を異型鉄筋とした場合の骨格曲線を計算により求めていることから、本検討ではこれらの検討結果を参考に、以下の方針にて、丸鋼を用いたRC部材の変形性能を把握することを試みる。

- ① No.7（異型鉄筋のケース）とNo.1（丸鋼のケース）の両試験体について、実験で得られた

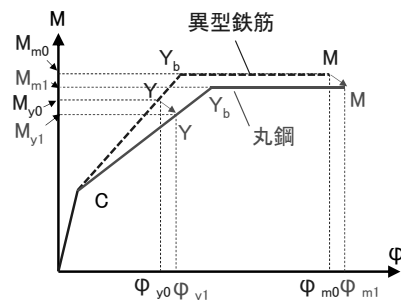


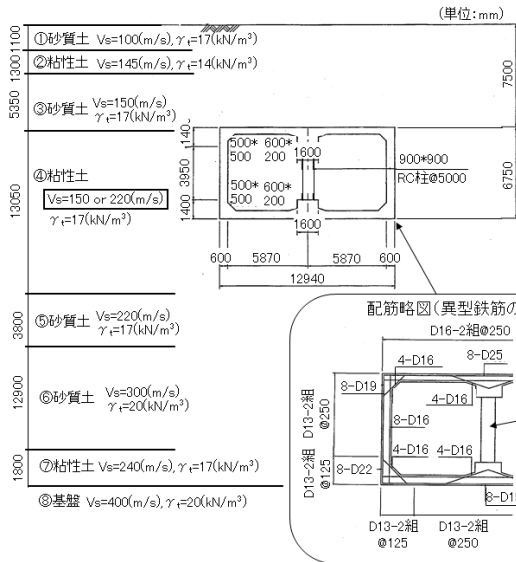
図-1 骨格曲線の設定

Y点・M点の荷重および変位（以下、実験値）を文献5)の荷重－変位関係から目視で読み取り、その実験値と、部材を異型鉄筋と仮定した場合のY点・M点の荷重および変位の計算値（以下、計算値）との比を算定する。

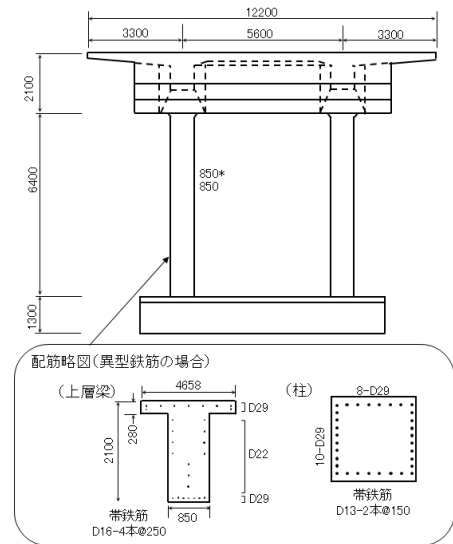
- ② ①で算定した実験値／計算値について、No.1とNo.7の算定値の比をとり、この比を異型鉄筋に対する丸鋼のY点・M点における荷重・変位の比とみなす。

上記①②にしたがい、実験値と計算値の比を算定した結果を表-1に示す。異型鉄筋に対する丸鋼の実験値／計算値の比の算定結果に着目すると、Y点については、荷重が0.77、変位が1.21となっており、異型鉄筋に比べて丸鋼のほうが付着強度が低いために荷重は小さくなる一方、鉄筋の抜け出しにより変位は伸びる傾向にある。また、M点については、荷重が0.93、変位が1.46となっており、丸鋼にすることで変位がさらに伸び、荷重は小さくなるが、M点の荷重（最大耐力）の差はそれほど大きくないことがわかる。

本検討ではこの結果に基づき、丸鋼を用いたRC部材の骨格曲線を設定する。具体的には、図-1に示すように、まず鉄筋を異型鉄筋と仮定して鉄道の設計標準<sup>6)</sup>に基づきC点（ひび割れ点）、Yb点、M点（最大耐力点）を算定し、これらの点を結ぶトリリ



(a) 開削トンネル



(b) ラーメン高架橋

図-2 解析対象構造物

表-2 解析ケース

| (a) 解析シリーズ一覧 |                     |                 |      | (b) 骨格設定条件          |                                          |                                  |                                          |                                  |                                 |
|--------------|---------------------|-----------------|------|---------------------|------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|
|              | 構造物モデル              | 地盤条件<br>(④層のVs) | 中柱間隔 |                     | $\phi y$                                 | $My$                             | $\phi m$                                 | $Mm$                             | 備考                              |
| Case1シリーズ    | 開削トンネル<br><図-2(a)>  | 150(m/s)        | 5m   | 異型鉄筋                | $\phi y_0$                               | $My_0$                           | $\phi m_0$                               | $Mm_0$                           | 鉄道の耐震標準 <sup>6)</sup><br>に基づき設定 |
| Case2シリーズ    | 開削トンネル<br><図-2(a)>  | 220(m/s)        | 5m   | 丸鋼基本ケース<br>(丸鋼1.0倍) | $1.2 \times \phi y_0$<br>( $=\phi y_1$ ) | $0.8 \times My_0$<br>( $=My_1$ ) | $1.5 \times \phi m_0$<br>( $=\phi m_1$ ) | $0.9 \times Mm_0$<br>( $=Mm_1$ ) | 表-1の値に<br>基づき設定                 |
| Case3シリーズ    | 開削トンネル<br><図-2(a)>  | 150(m/s)        | 2.5m | 丸鋼1.1倍              | $\phi y_1$                               | $1.1 \times My_1$                | $\phi m_1$                               | $1.1 \times Mm_1$                | 丸鋼基本ケースに<br>対し、耐力を変化            |
| Case4シリーズ    | ラーメン高架橋<br><図-2(b)> |                 |      | 丸鋼0.9倍              | $\phi y_1$                               | $0.9 \times My_1$                | $\phi m_1$                               | $0.9 \times Mm_1$                |                                 |
|              |                     |                 |      | 丸鋼0.8倍              | $\phi y_1$                               | $0.8 \times My_1$                | $\phi m_1$                               | $0.8 \times Mm_1$                |                                 |

ニア型でモデル化する。ただし、軸力は初期状態で固定とする。異型鉄筋を用いるケースでは、この骨格曲線を解析に用いる。一方、丸鋼を用いる場合については、表-1に示したY点およびM点における荷重の丸鋼／異型鉄筋の値をモーメントの修正倍率として、変位の丸鋼／異型鉄筋の値を曲率の修正倍率としてそれぞれ与えることにより、骨格曲線のY点およびM点を修正することとする。そして、C点、修正後のY点およびM点から新たなYb点を設定し、これらの点を結ぶことにより、丸鋼の骨格曲線を設定する。

## (2) 解析ケース

本検討における解析対象構造物は、図-2に示すような1層2径間の開削トンネルおよびラーメン高架橋とし、両構造物においてRC部材に異型鉄筋を用いた場合と丸鋼を用いた場合の応答を比較することにより、開削トンネル部材に丸鋼を用いることの有効性について検討する。

解析ケース一覧を表-2に示す。まず、表-2(a)に示すように、開削トンネルモデル（図-2(a)参照）

については、開削トンネルと同一の深さにある粘性土（④層）のVsと中柱間隔を変えた計3つの解析シリーズ（Case1～Case3シリーズ）を設定し、これに加えてラーメン高架橋モデル（図-2(b)参照）をCase4シリーズとする。本検討に用いる開削トンネルとラーメン高架橋はともに不静定構造物であるが、前者は周囲を地盤に囲まれていること、および前者は中柱と両側壁の3部材（しかも、中柱と両側壁の耐力が異なる）で水平力を支えるのに対し後者は同じ部材諸元である2本の柱で水平力を支えるという特徴の違いがある。そして、各解析シリーズに対して、異型鉄筋と丸鋼を用いたケースの解析を実施する。丸鋼を用いるケースについては、(1)で示した方法により異型鉄筋の骨格曲線を修正する「丸鋼基本ケース」（修正倍率は小数第2位を四捨五入して設定）に加えて、この丸鋼基本ケースに対してMyおよびMmを1.1倍、0.9倍、0.8倍と変化させることで、丸鋼の鉄筋量が変わって耐力が変化した場合の影響を把握するためのケースも実施する。本来であれば丸鋼の鉄筋量に応じて変形と耐力は連動して変

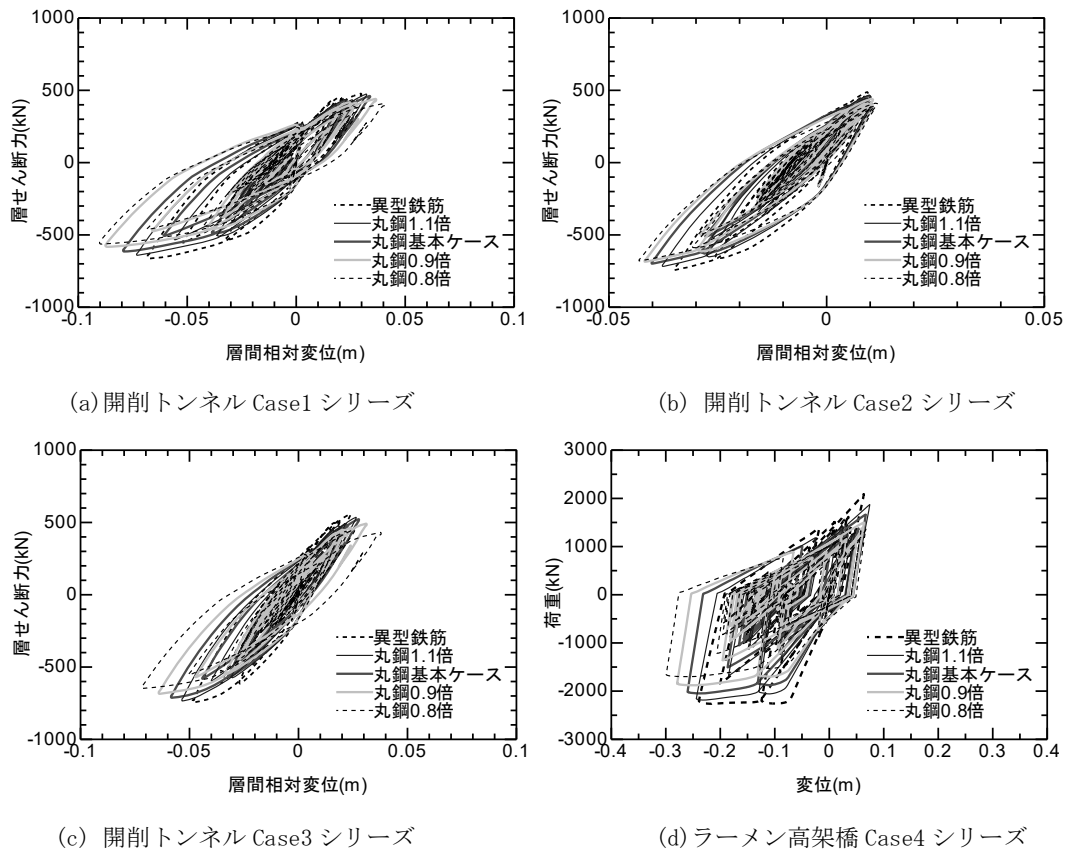


図-3 荷重－変位関係の比較

化するが、ここでは基礎的な検討として耐力のみを変えたケースを実施することとした。RC部材の履歴特性は全ケースにおいて修正武田型モデルを、また開削トンネルモデルにおける地盤の非線形性はGHE-Sモデルを用いて考慮し、鉄道の耐震標準<sup>6)</sup>におけるL2地震動スペクトルⅡ（G1地盤用）を基盤位置に入力して動的解析を実施する。動的解析のプログラムとしては、開削トンネルの解析にはAFIMEX-JR（鉄道総研開発）、ラーメン高架橋の解析にはDYNA2E（伊藤忠テクノソリューションズ）を用いた。

### 3. 丸鋼を用いた場合の影響検討

#### (1) 荷重－変位関係の比較

開削トンネル（Case1～Case3シリーズ）およびラーメン高架橋（Case4シリーズ）における荷重－変位関係を図-3にまとめて示す。なお、開削トンネルにおける荷重－変位関係は、文献7)の方法を用いて層せん断力－層間相対変位関係として整理した。各解析シリーズにおいて、異型鉄筋を丸鋼にすることで、あるいは丸鋼の耐力倍率が低下するにつれて荷重が低下し変位が伸びる傾向にある。ただし、荷重の低下割合は、開削トンネルの各シリーズよりもラーメン高架橋Case4シリーズのほうが大きく、また

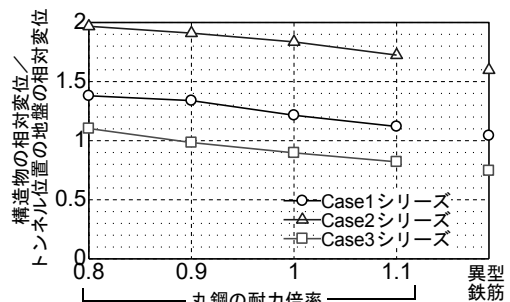


図-4 トンネルと地盤の相対変位比

変位の伸び量に着目すると、開削トンネルCase1シリーズおよびCase2シリーズでは、変位の増大が若干頭打ちになるのに対し、ラーメン高架橋Case4シリーズや開削トンネルCase3シリーズでは丸鋼の耐力倍率の低下割合に応じて変位が増大する傾向がある。荷重の低下割合の違いは、開削トンネルにおいて両側壁の耐力が高いため応力再配分の影響も大きい、変位の抑制については開削トンネルが周囲を地盤に囲まれていることが影響していると考えられ、変形性能が高い丸鋼を用いることで構造物全体の損傷が抑えられる可能性があることを示唆している。ただし、同じ開削トンネルでもCase3シリーズについては、変位が伸びる傾向にあるため、開削トンネルにおける丸鋼の有効性は、地盤条件・構造物条件にも依存すると考えられる。

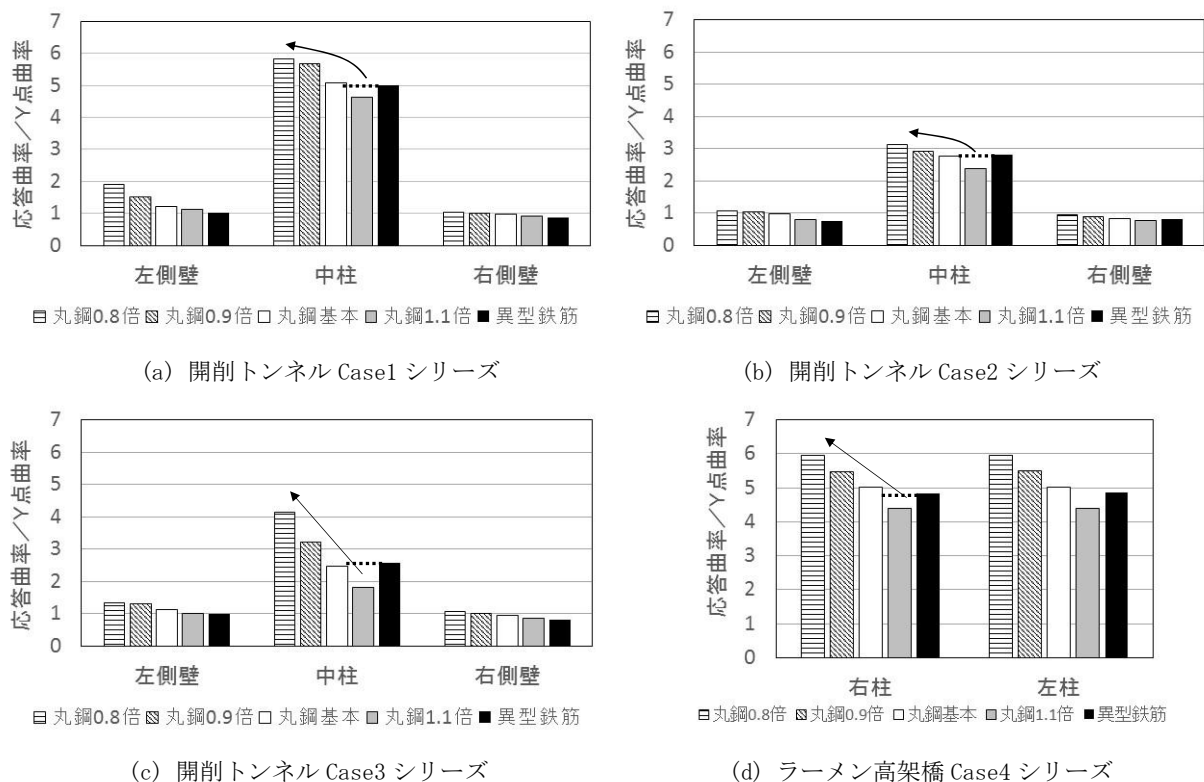


図-5 部材の応答曲率/Y点曲率（塑性率）の比較

## (2) 開削トンネルにおけるトンネルと地盤の変位比

次に、開削トンネル（Case1～Case3シリーズ）において、トンネル上下床版間の相対変位を、トンネル深さ位置の自然地盤の相対変位で割った値（トンネルと地盤の相対変位比）を図-4に示す。トンネルの中柱間隔が短く、かつ地盤が軟弱なCase3シリーズについては、トンネルと地盤の変形がほぼ同一あるいは地盤の変形のほうが大きくなるようなモードであり、一方Case1、Case2シリーズについては、トンネルの変形のほうが大きくなるモードであることがわかる。したがって、周囲を地盤に囲まれている開削トンネルでは、地盤よりもトンネルのほうが剛性が小さくなって変形しやすくなるケースにおいて、トンネルの変形を周囲の地盤が止めることでトンネルの変形量が抑えられることがわかる。

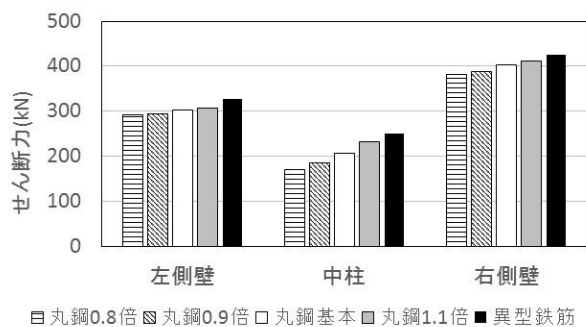
## (3) 曲げ破壊への影響

丸鋼を用いることによる曲げ破壊への影響を確認するため、開削トンネルにおける中柱と両側壁、およびラーメン高架橋の左右両柱について、Y点曲率に対する部材の応答曲率の比（塑性率）を算出した結果を図-5に示す。最も大きく損傷する部材（開削トンネル：中柱、ラーメン高架橋：左右両柱とも同程度の損傷）における異型鉄筋と丸鋼基本ケースの塑性率を比較すると、開削トンネルでは塑性率がほ

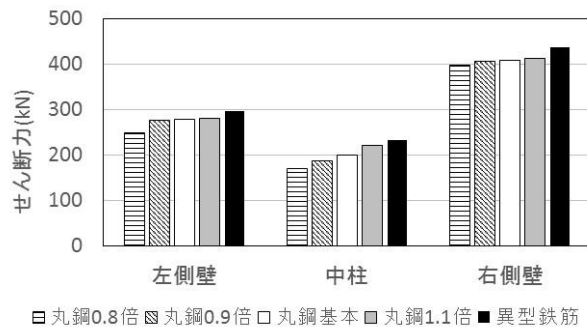
ぼ同一あるいは丸鋼のほうが塑性率が少し小さいのに対し、ラーメン高架橋では丸鋼のほうが塑性率が若干大きくなっている。一方、耐力低下に伴う塑性率の変化に着目すると、まず、ラーメン高架橋Case4シリーズについては、耐力低下に伴い左右両柱の塑性率が大きく変化することがわかる。次に、開削トンネルの解析結果に着目すると、Case3シリーズはラーメン高架橋Case4シリーズと同様に、最も損傷する中柱の塑性率が大きく変化する。一方、Case1シリーズについては、中柱の塑性率はCase3シリーズほど大きく変化せず損傷が頭打ちになり、その代わりに丸鋼0.8倍のケースにおいて左側壁の塑性率が少し増大傾向にある。つまり、中柱が損傷することによる応力再配分の影響で、他部材の損傷が進行する可能性があることに留意する必要がある。最後にCase2シリーズでは両側壁を含めた各部材において、塑性率の変化が少ないことがわかる。つまり、構造物が地盤に比べて軟らかくなるほど、変位量が頭打ちになる影響で各部材の曲げ損傷があまり進行しないことがわかる。

## (4) せん断破壊への影響

睦好ら<sup>7)</sup>が指摘している通り、鉄筋コンクリート部材に丸鋼を用いることで主鉄筋の付着を低下させることにより、せん断破壊を防止できる可能性がある。そこで最後に、丸鋼を用いることによる曲げ破



(a) 開削トンネル Case1 シリーズ



(b) 開削トンネル Case2 シリーズ

図-6 せん断力の比較

壊への影響が少ない開削トンネルCase1シリーズおよびCase2シリーズを対象に、中柱および両側壁のせん断力を比較した結果を図-5に示す。各部材において、丸鋼を用いたり丸鋼の耐力倍率を低減させることによりせん断力が低減していることから、開削トンネルに丸鋼を用いることでせん断破壊を防止できる可能性があることが確認できた。また、せん断力の低下割合が最も大きいのは、塑性率が最も大きい、つまり鉄筋の付着が最も低下していると考えられる中柱である。これは、中柱の損傷が先行することで、両側壁の耐力負担割合が増すことが原因であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、RC部材における鉄筋の付着強度を弱めた場合の代表として丸鋼を取り上げ、開削トンネルおよびラーメン高架橋部材の鉄筋に異型鉄筋および丸鋼を用いた場合を想定し、動的解析を実施することにより、周囲を地盤に囲まれている開削トンネルにおいて鉄筋の付着強度を弱めた場合の変位・曲げ損傷の抑制効果やせん断破壊の防止効果について検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

- 鉄筋の付着強度を弱めることにより、ラーメン高架橋では変形や曲げ損傷が大きくなる一方であるが、開削トンネルでは、特に地盤に比べてトンネルが大きく変形するケースにおいて、鉄筋の付着強度を弱めることでトンネルの変形が頭打ちに限り、大きく曲げ損傷する部材（本研究のケースでは中柱）の損傷が抑制される。ただし、応力再配分の影響で、他部材の損傷が多少進行する可能性があることには注意が必要である。
- 開削トンネルにおいて鉄筋の付着強度を弱めることにより、各部材のせん断力が低下することから、せん断破壊を防止できる可能性がある。

以上より、特に開削トンネルが地盤よりも大きく変形するモードの場合に、付着強度を弱めることで、特に大きい損傷の発生が懸念される部材の損傷程度を抑制することができ、他部材の損傷が多少進行しても、トンネル全体として崩壊に繋がる可能性が低減できることがわかった。本成果の活用方法として、例えば丸鋼が使われている既設の開削トンネルの耐震診断を実施する場合等において、付着強度の影響を考慮することにより開削トンネルの損傷をより合理的に評価する、などが考えられる。

#### 参考文献

- 睦好宏史，牧剛史，GovindaRaj PANDEY，杉田清隆：鉄筋の付着を制御することによるRC柱部材の耐震性状改善に関する研究，土木学会論文集，No.802/V-69，pp.155-169，2005。
- 岡本大，鬼塚良介，金森真，松岡茂：軸方向鉄筋に丸鋼を用いたT形RC梁のせん断耐力に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007。
- 澤松俊寿，三田村浩，西弘明，松本高志，加保勇介：柱部の鉄筋に丸鋼を用いた鉄筋コンクリート橋脚の履歴特性，構造工学論文集，Vol.58A，pp.333-342，2012。
- 松岡由高，中村光，国枝稔，河村 精一：有限要素解析による主筋に丸鋼を用いたRC部材の力学挙動評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，2011。
- 伊東典紀，桑木野耕介，大郷貴之：丸鋼を用いたRC柱の地震時破壊形態，Structural engineering data (SED)，No.47，pp.120-127，2016。
- 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012。
- 西山誠治，川満逸雄，室谷耕輔，西村昭彦：開削トンネルの応答変位法による荷重変位曲線の算定に関する一考察，土木学会第55回年次学術講演会，I-B487，2000。