

メナーゼヒンジの設計式の改良

植村 佳大¹・高橋 良和²

¹学生会員 工修 京都大学大学院工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

²正会員 工博 京都大学教授 京都大学工学研究科（〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂）

1. はじめに

我が国初の高速道路である名神高速道路では、支間15mの5径間連続RC中空床版橋において、橋脚下端にメナーゼヒンジを配置した橋脚が採用されている。メナーゼヒンジとは、X字状に交差させた鉄筋（以降、交差鉄筋とする）と、交差鉄筋の防食および座屈防止の役割を持つ被覆コンクリート（以降、ヒンジ部コンクリートとする）により形成されたコンクリートヒンジである^{1),2),3)}。そしてこのメナーゼヒンジにはヒンジとしての機能が期待されているが、ヒンジ部コンクリートがヒンジ部の曲げ剛性を増加させることがParson and Stang⁴⁾によって指摘されている。また、筆者らの先行研究^{5),6),7),8)}においても、ヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジが回転剛性を示すことが確認された。しかし、現在の我が国のメナーゼヒンジの耐震設計では、メナーゼヒンジ部に作用する軸力及びせん断力に対し、ヒンジ部コンクリートの存在を無視した照査が行われており、作用回転角が一定値以下であればヒンジ部の回転剛性は小さいとみなせると規定されている⁹⁾。また、兵庫県南部地震において、本来ヒンジとしての機能が期待されたメナーゼヒンジが回転剛性を発揮したことで、柱躯体に曲げモーメントが伝達され、交差鉄筋の段落とし部で曲げ損傷が発生した事例が確認されている。さらに既往研究においても、メナーゼヒンジを有する部材において、柱躯体への曲げモーメント伝達に起因する損傷が確認されている¹⁰⁾。

そこで本研究では、ヒンジ部コンクリートがヒンジ部の回転性能に与える影響をメナーゼヒンジの設計基準に反映させることを目的として、過去に筆者らが行った先行研究（文献5～8）での実験結果を参考に、メナーゼヒンジの実際の挙動を照査できる新たな設計基準を提案する。

2. メナーゼヒンジの設計について

(1) 交差鉄筋に発生する応力に関する照査

道路橋支承便覧⁹⁾では、メナーゼヒンジに作用する軸力とせん断力に対して、交差鉄筋の応力が制限値を超えないよう設計を行うことが規定されている。その際、交差鉄筋に作用する応力はParson and Stang⁴⁾によって提案された理論的解法に対して、内山¹¹⁾が誘導した計算式を簡略化した以下の式を用いることとしている。

$$\sigma_{sc} = \frac{N}{nA_s \cos \theta} + \frac{S}{nA_s \sin \theta} < \sigma_{yd} \quad (1)$$

$$\sigma_{yd} = \xi_1 \Phi_y \sigma_{yc} \quad (2)$$

ここに、 σ_{sc} は交差鉄筋の圧縮応力度、 N は作用軸力、 S は作用せん断力、 n は交差鉄筋本数、 A_s は交差鉄筋1本の断面積、 θ は交差鉄筋の部材軸方向に対する角度、 σ_{yd} は交差鉄筋の圧縮応力度の制限値、 ξ_1 は調査・解析係数、 Φ_y は抵抗係数、 σ_{yc} は交差鉄筋の降伏強度の特性値である。ここで、式(1)では、ヒンジ部コンクリート部の変形および抵抗を無視している。そのため、メナーゼヒンジ部に作用する軸力とせん断力を交差鉄筋の軸圧縮力のみで抵抗すると仮定しており、交差鉄筋には常に圧縮応力が作用することを前提としている。しかしながら、実際には交差鉄筋交差部にはヒンジ部コンクリートが存在しており、現行の設計基準が実際の交差鉄筋の挙動を表現できていない可能性が考えられる。

(2) メナーゼヒンジ部の回転剛性に関する照査

道路橋支承便覧では、回転角が0.05rad以下となる範囲においては、メナーゼヒンジ部に生じる曲げモ

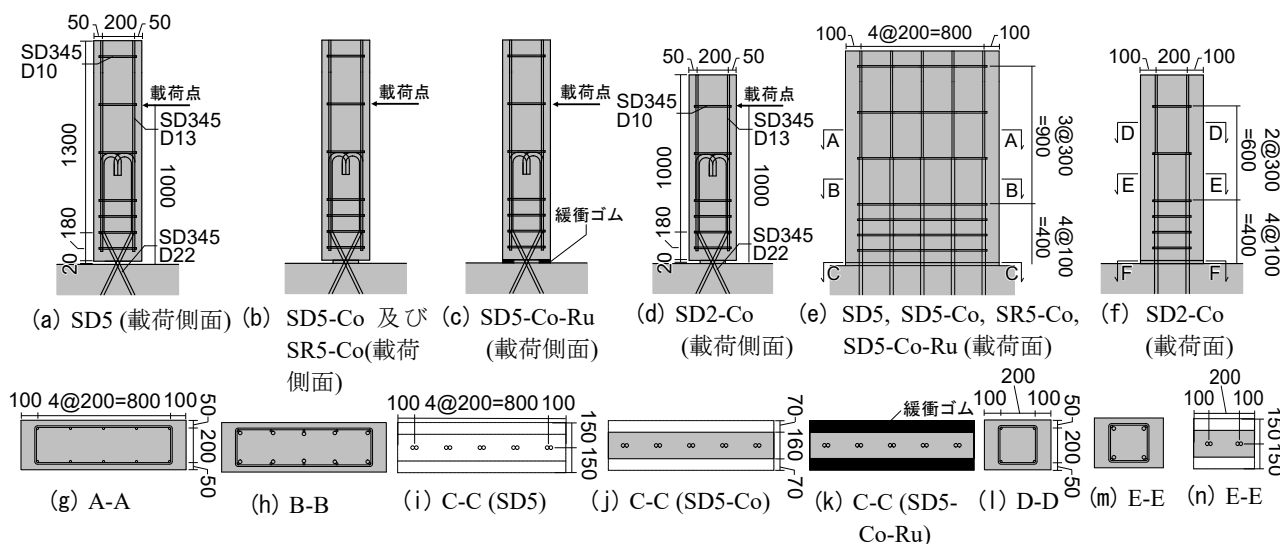


図-1 供試体の配筋図

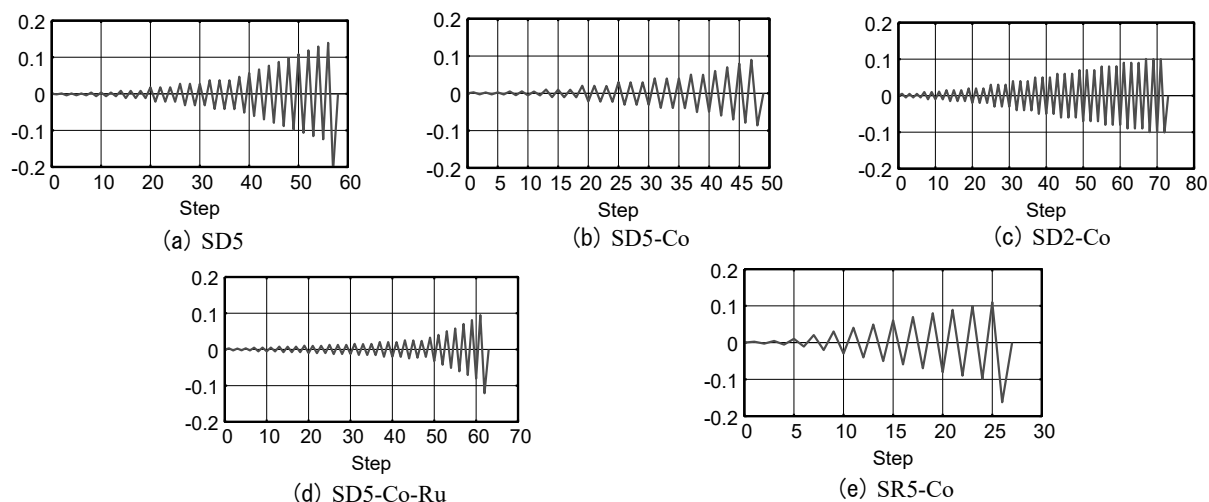


図-2 荷重サイクル

ーメントは小さいとみなせると定められており、ヒンジ部の曲げ剛性については考慮されていない。その一方で、1.で述べたように、これまでの先行研究^{5),6),7),8)}にてメナーゼヒンジ部が回転剛性を有することが確認されている。そのため、メナーゼヒンジの設計基準に曲げ剛性に関する規定を取り入れるべきであるといえる。また、道路橋支保便覧では、「ヒンジの隙間にゴム板などの緩衝材を設置するのがよい」とされているが、緩衝ゴムの設置によるヒンジ部の回転剛性の変化については記述されていない。

3. 正負交番荷重実験概要

(1) 実験供試体

本研究では、ヒンジ部コンクリートがヒンジ部の回転性能に与える影響をメナーゼヒンジの耐震基準

に反映させることを目的として、文献^{5)~8)}で実施した正負交番実験結果に関して検討を行う。図-1に各供試体の配筋図を示す。なお、コンクリートの圧縮強度は、テストピースによる圧縮試験によりSD2-Coでは30.1MPa、それ以外の試験体では30.0MPaと算出した。また、SD2-Coで使用した鉄筋に対して引張試験を行い、SD345-D22のヤング率を199200N/mm²、降伏応力386.9N/mm²、SD345-D13のヤング率を195100N/mm²、降伏応力390.5N/mm²と算出した。

(2) 荷重パターン

荷重パターンは正負交番変位漸増方式を採用し、各供試体に対し適宜荷重振幅を設定し荷重を行った。ここで、各供試体における荷重サイクルを図-2に示す。また荷重軸応力は1.2MPaとした。

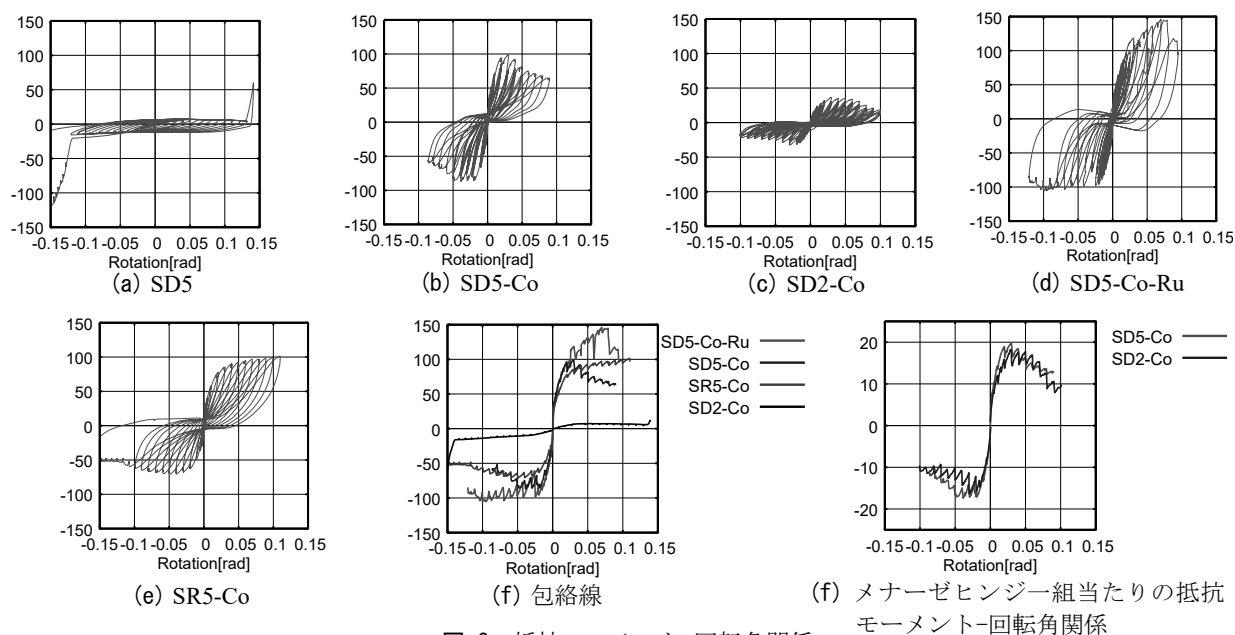


図-3 抵抗モーメント-回転角関係

4. 実験結果及び考察

(1) モーメント-回転角関係

各供試体のモーメント-回転角関係およびモーメント-回転角関係の包絡線の比較を図-3に示す。なお、図中ではP-A効果による抵抗モーメント低下を取り除いている。図-3を見ると、ヒンジ部コンクリートがないSD5では、回転角が増加したとしても大きな抵抗モーメントが発生せず、設計時の想定と同じく安定したヒンジ機構が発現しているといえる。

一方、ヒンジ部コンクリートを有する供試体では、回転角の増加に伴って大きな抵抗モーメントが発現し、いずれの供試体でも回転角0.04rad以前の回転角で最大抵抗モーメントを示した。そのため、回転角0.05radの領域内では大きな抵抗モーメントは発生しないとしている現行のメナーゼヒンジの設計は、実際の挙動を正しく捉えていないといえる。

次に、SD5-CoとSD5-Co-Ruを比較すると、最大抵抗モーメントにおいて、約1.5倍の違いがあることがわかる。しかしながら、回転角が0.02rad程度の変形領域であれば、両供試体の回転角-抵抗モーメント関係に大きな差異はない。そのため、本供試体においては、ヒンジ部に設置された緩衝ゴムはヒンジ部の抵抗モーメントに影響を与えるものの、回転角が0.02rad程度の変形領域であれば、その影響は小さいことがわかった。

また、SD5-CoとSR5-Coを比較すると、SR5-Coにおける最大抵抗モーメントの増加がSD5-Coに比べ緩やかとなっている。これは、交差鉄筋と周辺のコンクリートの付着特性の違いによるものであると考

えられる。そこで次項にて、その詳細を検討する。

また、SD5-CoとSD2-Coにおけるメナーゼヒンジ1組当たりの抵抗モーメント-回転角関係を図-4(f)に算出した。図-4(f)を見ると、両供試体間でメナーゼヒンジ1組当たりの最大抵抗モーメントは概ね一致していることがわかる。そのため、ヒンジ部が示す最大抵抗モーメント算定の際は、メナーゼヒンジ1組あたりの値を実際のメナーゼヒンジの個数分に換算すればよいことがわかった。しかしその一方で、最大抵抗モーメントに達するまでの回転剛性に差異が見られた。これは、交差鉄筋と周辺のコンクリートの付着特性の違いによるものであると考えられるため、次項にてその詳細を検討する。

(2) 交差鉄筋のひずみ

図-4に柱高さ0mmにおける交差鉄筋ひずみと回転角の関係を示す。ここで先述のように、現行の設計では、メナーゼヒンジに作用する軸力とせん断力に対して、交差鉄筋の応力に関する照査が行われているが、その際、ヒンジ部コンクリートの存在が無視されているため、交差鉄筋は圧縮変形することが前提となっている。しかし図-4を見ると、ヒンジ部コンクリートを有さないSD5では、交差鉄筋に軸圧縮ひずみが発生しているものの、ヒンジ部コンクリートを有する供試体では、交差鉄筋に軸引張ひずみが発生し、その値は降伏値を大きく上回っていることがわかる。このことから、ヒンジ部コンクリートの有無が交差鉄筋の挙動に影響を与えており、ヒンジ部コンクリートの存在を無視して交差鉄筋に発生する応力の照査を行っている現行の設計は、実際の挙

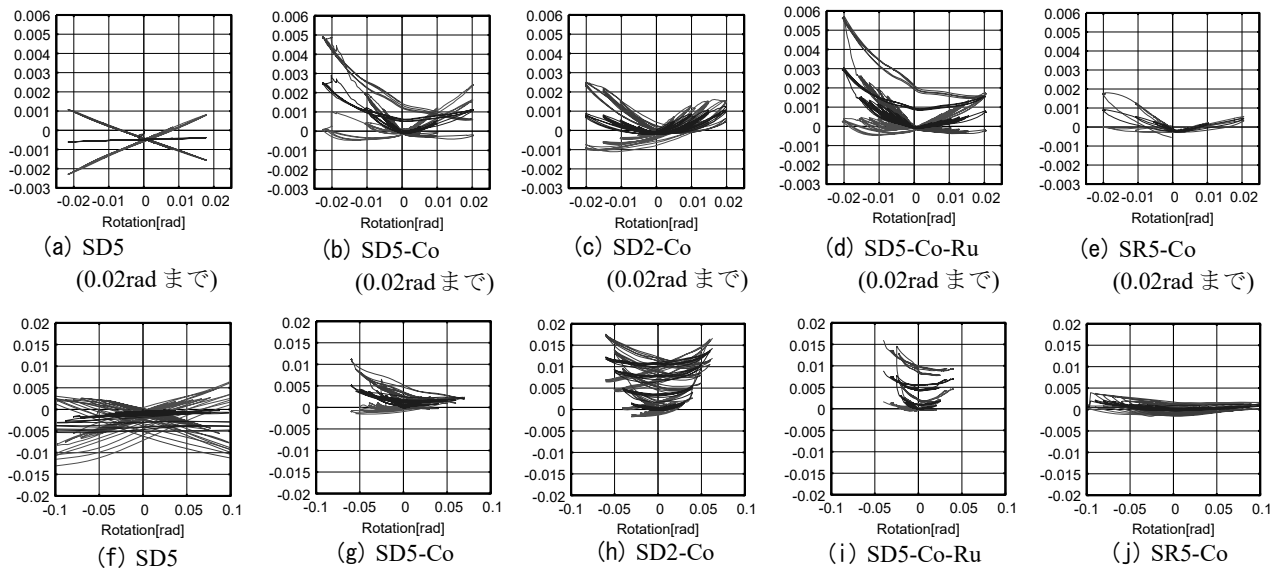


図-4 交差鉄筋ひずみ-回転角関係 (赤線・緑線：断面最外縁ひずみ，青線：軸ひずみ)

動を正しく捉えていないといえる。

また、交差鉄筋に丸鋼を用いたSR5-Coでは、異形鉄筋を用いた供試体と比較し、交差鉄筋ひずみの値が小さくなっていることがわかる。これは、丸鋼を用いることで交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着が早期に喪失するため、ヒンジ部における交差鉄筋の変形が軽減されたことが原因であると考えられる。そしてヒンジ部の交差鉄筋ひずみの軽減により、交差鉄筋の発揮する引張力が低下したことで、4. (1) で述べたSD5-CoとSR5-Coにおける抵抗モーメントの差異が生じたと考えられることができる。

また、SD5-Co-RuとSD5-Coの交差鉄筋ひずみを比較すると、回転角0.02rad程度の領域では同程度の値を示していることがわかる。そのため、モーメント-回転角関係と同様、回転角が0.02rad程度の変形領域であればヒンジ部の隙間に設置された緩衝ゴムの影響は小さいことがわかった。

一方、SD2-CoとSD5-Coでは鉄筋比や載荷軸応力の値が等しいため、本来、交差鉄筋に発生するひずみは同程度になると予想されるが、それにも関わらず交差鉄筋ひずみに差異が見られた。これは、各供試体間で交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着状況に差が生じたためであると推測され、これがヒンジ部の回転剛性の差異の要因であると考えられる。

5. メナーゼヒンジの設計基準に関する一考察

(1) 現行のメナーゼヒンジの設計基準における問題点と本検討の目的

現行のメナーゼヒンジの設計基準では、作用軸力

とせん断力に対する照査において、ヒンジ部コンクリートの影響が考慮されていないため、交差鉄筋が圧縮変形することが前提となっている。また、回転角0.05radまでの変形領域ではヒンジ部の回転剛性は小さいとしている。しかし、4. で述べた実験結果により、これらの点は実際の挙動を正しく捉えておらず、ヒンジ部コンクリートの影響を反映させた設計基準が必要であることが明らかになった。そこで本章では、ヒンジ部コンクリートの影響を考慮してメナーゼヒンジの回転性能を照査する手法として、ファイバー要素を用いた立体解析による手法(以下、手法Aとする)と断面解析による手法(以下、手法Bとする)を提案する。そしてSD5-CoとSD2-Coに対し提案手法を適用することで、提案手法の妥当性を検討する。その際、ヒンジ部コンクリートが存在することで交差鉄筋に引張ひずみが発生することが実験により明らかになったため、本検討では交差鉄筋が引張降伏する点をメナーゼヒンジの限界状態と定義することで、ヒンジ部の許容回転角を算定することとする。また、本来メナーゼヒンジは大きな回転角を想定して提案された構造ではなく、実構造物にメナーゼヒンジを適用する際も、回転角が大きい領域での性能をメナーゼヒンジに期待していない。そこで本検討では、メナーゼヒンジの抵抗モーメント低下挙動を踏まえたモーメント-回転角関係を算定する必要はないと考え、最大抵抗モーメントを示すまでのモーメント-回転角関係を算定することとした。

(2) 提案手法について

a) ファイバー要素を用いた立体解析による手法

筆者らは先行研究⁸⁾にて、ファイバー要素でモデ

ル化したヒンジ部コンクリートと交差鉄筋を並列して配置することで交差鉄筋ひずみ及びヒンジ部の抵抗モーメント-回転角を再現できることを明らかにした(図-5)．その際、交差鉄筋はヒンジ部のみで変形しているのではなく、ヒンジ部コンクリートとの付着劣化により柱高さ方向にひずみが平滑化していることを考慮し、交差鉄筋の交差長さ(図-5中のH)を適切に決定して交差鉄筋のヒンジ部での変形の集中を過大評価しないような工夫を行った．具体的には、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートが完全付着している場合は $H = (\text{ヒンジ部コンクリート高さ})$ 、付着が完全に喪失している場合は $H = (\text{交差鉄筋の交差部の最大高さ})$ と表現できると考え、その間にメナーゼヒンジの実際の挙動を再現する上で最適なHが存在すると考えた．しかし、鉄筋比および載荷軸応力が等しい場合でも交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着性状は異なるため、メナーゼヒンジの回転剛性および限界状態を算定する際に、事前に適切な交差鉄筋の交差長さHを予測することは困難であるといえる．そこで本検討では、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートが完全付着している場合と付着が完全に喪失している場合の回転剛性および限界状態を算定し、得られた算定値をそれぞれ上限および下限とする手法を提案する．なお、紙面の都合上、解析モデルの詳細は文献7)を参照されたい．

b) 断面解析による手法

Leonhardt and Reinmann¹²⁾は、圧縮軸力と曲げを受けるコンクリート継手に対し、継手断面の力の釣り合いとモーメントの釣り合いおよび図-6に示す幾何学的関係から、コンクリート継手部の回転剛性に関する理論式を提案している．

$$K_{\theta} = \frac{M}{\theta} = \frac{9a^3bE_0}{8s} \cdot m(1-2m)^2 \quad (3)$$

$$\theta = \frac{\Delta S}{a-r} = \frac{1}{a-r} \cdot s \cdot \frac{\sigma_R}{E_0} = s \cdot \varphi \quad (4)$$

ここで、 K_{θ} は継手の回転ばね定数、 M は継手部の曲げモーメント、 N は作用軸力、 θ は回転角、 a は継手面の長さ、 b は継手幅、 s は圧縮応力の影響範囲、 E_0 はコンクリートのヤング係数、 m は荷重偏心率($m = M/(N \cdot a)$)、 φ は継手断面の曲率である．すなわちLeonhardt and Reinmannは、式(3)および式(4)から、継手断面の断面解析により断面の M - φ 関係を算出し、継手部の圧縮力の影響範囲 s において φ が一定であると仮定して $\theta = \varphi s$ とすることで、軸力と曲げを受けるコンクリート継手の回転剛性が導出できるとしてい

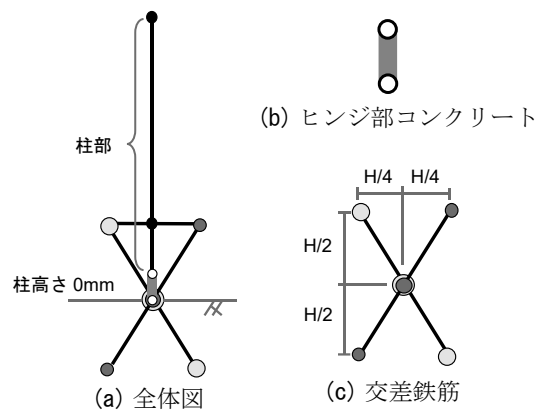


図-5 手法 A で用いるモデル

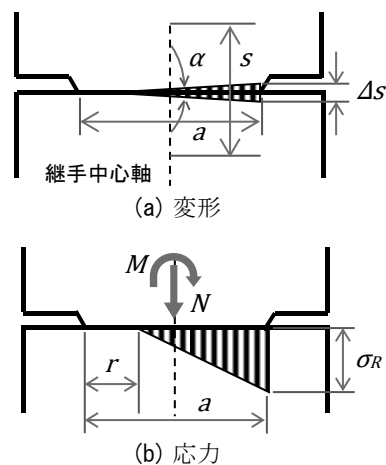


図-6 コンクリート継手断面の変形と応力

る．そしてLeonhardt and Reinmannは、継手部の圧縮力の影響範囲 s は継手部の幅と同程度としてよいと述べている．しかし、曲率 φ を一定とする区間 s の値が回転角の増大に関わらず変化しないという仮定では、継手部の目開きにより回転角が増大するにつれて変形が継手断面に集中する挙動を再現できない．

そのような中、鉄道構造物等設計標準・同解説ーシールドトンネル¹³⁾では、Leonhardt and Reinmannが提案したものと同様の式を用いてコンクリート継手部の回転剛性を算定することとしている．その際、曲率 φ を一定とする区間 s は、継手部断面の圧縮縁から中立軸までの距離の2倍と仮定している．継手部断面の圧縮縁から中立軸までの距離は回転角の増大に伴い小さくなるため、この仮定を用いることで、回転角が増大するにつれて変形が継手部断面に集中していく挙動を再現することができるといえる．

そこで本検討では、圧縮軸力と曲げを受けるという点でコンクリート継手とメナーゼヒンジの力学性状が類似していると考え、Leonhardt and Reinmannおよ

び鉄道構造物等設計標準・同解説ーシールドトンネルによるコンクリート継手の回転剛性の算定法に倣い、メナーゼヒンジ部の断面解析を行ってヒンジ部断面のM- ϕ 関係を算出し、 $\theta = \phi s = \phi \times (\text{断面の圧縮縁から中立軸までの距離}) \times 2$ とすることで、メナーゼヒンジ部が示すモーメント-回転角関係を算定する手法を提案する。

(3) 提案手法で用いた材料パラメータについて

交差鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性バイリニアとし、降伏応力およびヤング率は引張試験の結果を参考に降伏応力 386.9N/mm^2 および 199200N/mm^2 とした。なお、鉄道構造物等設計標準・同解説ーシールドトンネルでは、継手部に位置した引張部材を考慮する際、引張部材が示す圧縮抵抗は無視することとしているが、本検討では引張部材(交差鉄筋)の圧縮抵抗も考慮することとする。また、レオンハルトおよび鉄道構造物等設計標準・同解説ーシールドトンネルにおける回転剛性の理論式では、コンクリートの応力-ひずみ関係は線形と仮定されていたが、本検討ではコンクリートの最大圧縮応力時ひずみを0.002として、それ以前の応力-ひずみ関係は道路橋示方書-耐震設計編¹⁴⁾を参考とし、それ以後は応力が一定となるモデルを用いた。その際、コンクリートのヤング率は 28000N/mm^2 、最大圧縮応力は 30.0MPa とした。

(4) 検討結果

a) ファイバー要素を用いた立体解析による手法

図-7に提案手法により算定された抵抗モーメント-回転角関係を示す。図-7を見ると、どちらの供試体においても実験で得られた最大抵抗モーメントを概ね算定できているといえる。

また、SD5-Coにおいては、実験で得られた回転剛性が、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着を仮定した場合と付着の喪失を仮定した場合における回転剛性の間の値となっていることがわかる。一方、SD2-Coにおいては、実験で得られた回転剛性が、付着の喪失を仮定した場合における回転剛性と同程度の値となっている。以上から、本提案手法を用いることで、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着性状により変化するメナーゼヒンジの回転剛性の上限値と下限値を算定できることがわかった。

一方、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着を仮定した場合、交差鉄筋が引張降伏するときの回転角がSD5-Coで 0.0032rad 、SD2-Coで 0.0031 と非常に小さく算定されることがわかる。これらの値は

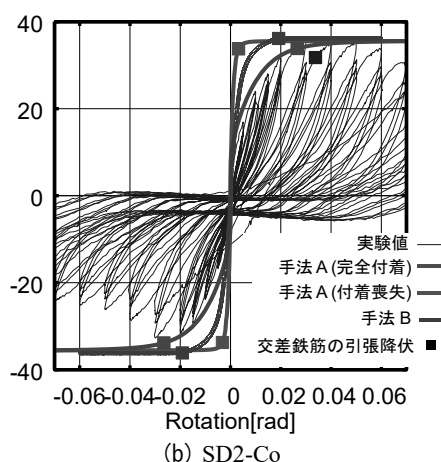
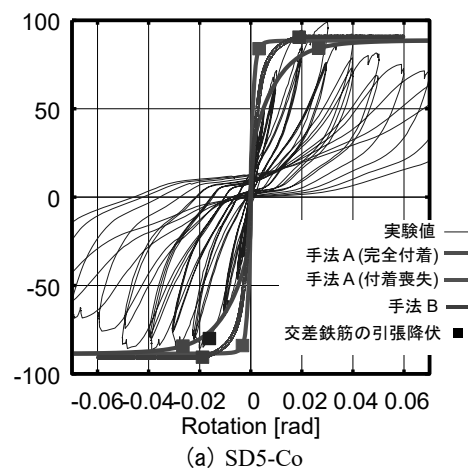


図-7 提案手法により算定した抵抗モーメント-回転角関係

実験で得られた交差鉄筋の降伏点と大きく異なるのに加え、この値をメナーゼヒンジの許容回転角と定義した場合、各国の設計基準(ドイツ: 0.01rad 、イギリス: 0.0114rad 、フランス: 0.05rad)と比較してメナーゼヒンジの許容回転角を過度に安全側に算出してしまふことがわかる。そのため、本提案手法を用いる場合、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着を仮定して算出した交差鉄筋の引張降伏点を限界状態と定義し、そのときの回転角をメナーゼヒンジの許容回転角の下限とするのは適当ではなく、許容回転角の算定の際は、付着の喪失を仮定して算出した交差鉄筋の引張降伏点に安全率を掛けるなどして対応するべきであるといえる。

b) 断面解析による手法

図-7に提案手法により算定された抵抗モーメント-回転角関係を示す。図-7を見ると、どちらの供試体においても実験で得られた最大抵抗モーメントを概ね算定できているといえる。

一方、実験値と比較して回転剛性が過大に算出さ

れていることがわかる。これは、本提案手法では断面解析の際に平面保持の仮定を適用しているため、交差鉄筋とヒンジ部コンクリート間の付着劣化を考慮できず、交差鉄筋ひずみが過大に算定されていることが原因であるといえる。しかしながら、本手法では $\theta = \varphi s = \varphi \times (\text{断面の圧縮縁から中立軸までの距離}) \times 2$ とすることで、完全付着の仮定によるヒンジ部での変形集中の影響を緩和しているため、算定値と実験値との差異が、手法Aにおいて交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着を仮定した場合と比較して小さくなっている。以上から、本提案手法を用いる場合、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着の仮定により、手法Aによる算定値ほどではないものの、メナーゼヒンジの回転剛性を過大に算出する点に留意する必要があることがわかった。

また、交差鉄筋の引張降伏点については、SD5-Coにおいて、実験値を概ね再現できているといえる。一方、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着劣化が顕著であったSD2-Coでは、引張降伏の際の回転角を実験値より過少に算出していることがわかる。しかしこれは、メナーゼヒンジの許容回転角を安全側に評価していると考えることができ、各国の設計基準と比較しても、その値は過度に安全側となっていないといえる。

(4) ヒンジ部コンクリートがメナーゼヒンジの回転挙動に与える影響

本項では、ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジの回転挙動に与える影響について考察する。その際、手法Aに関しては、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの完全付着を仮定した場合の検討を行うこととした。図-8にヒンジ部コンクリート幅を変化させたときのメナーゼヒンジの抵抗モーメントー回転角関係を示す。図-8(a)より、手法Aに関しては、ヒンジ部コンクリート幅が小さくなるほど、メナーゼヒンジの挙動は純粋なヒンジ挙動に近づいていくことがわかる。また、ヒンジ部コンクリート幅が小さくなるほど、交差鉄筋では曲げ変形が卓越するため、交差鉄筋の引張降伏点を限界状態と定義した場合、メナーゼヒンジの許容回転角が大きくなることがわかる。1.で述べたように、ヒンジ部コンクリートには交差鉄筋の防食の役割があり、維持管理の面ではヒンジ部コンクリート幅は大きい方が望ましい。しかしながら、本検討結果から、過度にヒンジ部コンクリート幅を大きくするのではなく、メナーゼヒンジに期待する回転性能に応じて適切に寸法を決定すべきであるといえる。また、ヒンジ部コンクリ

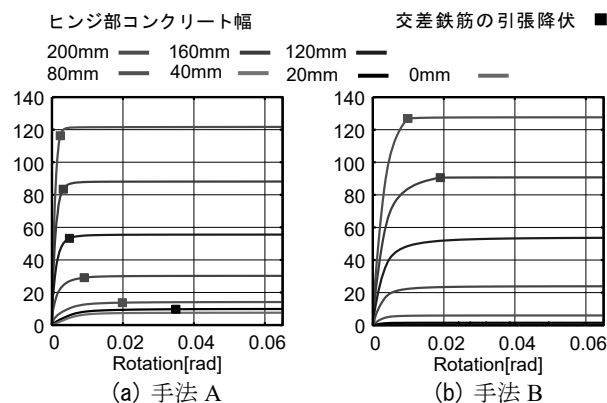


図-8 ヒンジ部コンクリート幅が抵抗モーメントー回転角関係

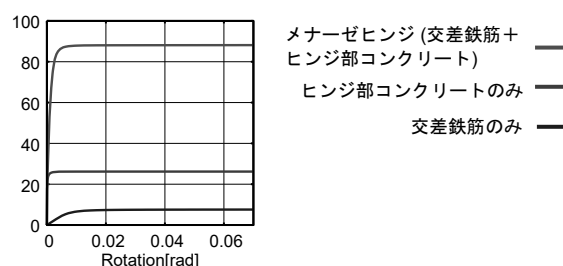


図-9 メナーゼヒンジ、ヒンジ部コンクリートのみ、交差鉄筋のみが示す抵抗モーメントの比較

ト幅が160mmの場合における抵抗モーメントー回転角関係について、ヒンジ部に交差鉄筋のみを配置した場合とヒンジ部コンクリートのみを配置した場合との比較を図-9に示す。図-9を見ると、メナーゼヒンジが示す抵抗モーメントは、単にヒンジ部コンクリートのみの場合と交差鉄筋のみの場合の抵抗モーメントを足し合わせた値と大きく異なることがわかる。このことから、現行の設計のようにヒンジ部コンクリートの作用を無視するのではなく、ヒンジ部コンクリートと交差鉄筋を組み合わせることにより適切にヒンジ部の抵抗モーメントを評価する必要があるといえる。

一方、手法Bを用いた場合のメナーゼヒンジの抵抗モーメントー回転角関係を見ると(図-8(b))、手法Aを用いた場合と異なり、ヒンジ部コンクリートの幅が一定値以下になると交差鉄筋が引張降伏を示さず、ヒンジ部の抵抗モーメントも小さく算出されることがわかる。これは、断面解析による手法では、ヒンジ部の回転に伴う交差鉄筋の幾何学的な回転変形が考慮できないため、ヒンジ部の回転変形が卓越する場合の挙動が表現できないためであると考えられる。そのため、ヒンジ部コンクリート幅によっては手法Bを適用できない場合があるといえ、その適用範囲については検討の余地があるといえる。

6. まとめ

本研究では、先行研究での実験結果を基に、メナーゼヒンジの実際の挙動を照査できる新たな設計基準を提案した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- ヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジでは、交差鉄筋に引張りずみが発生することが明らかとなった。そのため、作用軸力とせん断力に対する照査の際、交差鉄筋に圧縮変形が生じることを前提としている現行の耐震基準は適切でないことがわかった。
- ヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジでは、回転角 0.04rad 以前の回転角で最大抵抗モーメントを示した。そのため、回転角が 0.05rad 以下となる範囲ではメナーゼヒンジ部に生じる曲げモーメントは小さいとしている現行の設計基準は適切でないことがわかった。
- 本研究で対象とした試験体において、メナーゼヒンジの隙間に設置する緩衝ゴムの有無は、回転角 0.02rad 程度の変形領域に限り、ヒンジ部の回転性能に影響を与えないことが分かった。
- メナーゼヒンジの交差鉄筋に丸鋼を用いた場合、異形鉄筋を用いた場合と比較してヒンジ部の加點剛性が小さくなることがわかった。
- ファイバー要素を用いた立体解析を行うことで、メナーゼヒンジの最大抵抗モーメントを算定できることがわかった。また、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートが完全付着している場合と付着が完全に喪失している場合の回転剛性を算定することで、メナーゼヒンジが示す回転剛性の上限値および下限値を算出できることがわかった。
- 断面解析を用いた解析を行うことで、メナーゼヒンジの最大抵抗モーメントを算定できることがわかった。また本手法を用いる際は、メナーゼヒンジの回転剛性を過大に算出する点に留意する必要があることがわかった。また、ヒンジ部コンクリート幅が小さくヒンジ部の回転変形が卓越する場合は適用できないことがわかった。
- 断面解析を用いた解析において、交差鉄筋の降伏点を限界状態と定義することで、メナーゼヒンジの許容回転角を安全側に算定できることがわかった。
- ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジの回転挙動に与える影響に関する検討から、過度にヒンジ部コンクリート幅を大きくせず、メナーゼヒンジに期待する回転性能に応じて適切に寸法を決定するべきであることがわかった。

謝辞：本研究の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)(一般)18H01522の助成を受けて実施した。謝意を表します。

参考文献

- 1) Mesnager, A. : Experiences sur une semi-articulation pour voutes en Béton armé, Annales de Ponts de Chaussees, 2, pp.180-201, 1907.
- 2) Marx, S. and Schacht, G. : Concrete hinges historical development and contemporary use, 3rd Fib International Congress, pp.10-16, 2010.
- 3) Schacht, G, Marx, S. : Proceedings of the Institution of Civil Engineers Engineering History and Heritage, Vol.168, Issue. EH2, pp.64-74, 2015.
- 4) Parsons, D.E., Stang, A.H. : Test of Mesnager hinges, Journal of the American Concrete Institute Vol.31, Issue.1, pp.304-325, 1935.
- 5) Ahmed, R.A., 高橋良和, 栢木正喜 : Seismic performance of slender wall-type pier with concrete hinge, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, I-122, 2015.
- 6) 李首一, 伊川嘉昭, 高橋良和, 栢木正喜, 桑原秀明 : メナーゼヒンジの回転剛性を考慮したロッカー橋脚を有する橋梁の耐震性能検討, 土木学会第70回年次学術講演会概要集, I-123, 2015.
- 7) Li, S., Ikawa, Y., Ohshiro, T., Takahashi, Y. and Hashinoki, M. : An examination of the seismic performance of rocker pier bridges in Japans oldest expressway, Proc. of International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2016.
- 8) 植村佳大, 高橋良和, 長崎裕貴 : メナーゼヒンジを有するロッカー橋脚のUBRC補強による耐震性能向上に関する検討, 第38回地震工学研究発表会講演論文集, No. 1292, 2018.
- 9) 日本道路協会 : 道路橋支承便覧, 2018.12
- 10) 高原良太, 広瀬剛, 緒方辰夫, 武田篤史 : メナーゼヒンジを有する部材の耐震性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.775-780, 2017.
- 11) 内山実 : メナーゼ鉸の圧縮試験に就て, 土木学会誌, 第23巻, 第5号, pp.471-487, 1937.
- 12) Leonhardt, F. and Reinmann, H. : Betongelenke, DER-BAUINGENIEUR, VOL.41, pp49-56, 1966.
- 13) 財団法人鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説ーシールドトンネル, 1997.
- 14) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 2017.