ヒンジ部コンクリートが メナーゼヒンジの力学特性に与える影響

植村 佳大¹·高橋 良和²

¹学生会員 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) E-mail: uemura.keita.35a@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 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) E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

我が国のメナーゼヒンジの耐震設計では、ヒンジ部コンクリートの影響が考慮されていない. そこで本 研究では、筆者らが行った先行研究での実験結果を参考に、ヒンジ部コンクリートがメナーゼヒンジの力 学特性に与える影響を検討した. その結果、ヒンジ部コンクリートによりメナーゼヒンジの抵抗モーメン トが増加することや交差鉄筋に引張ひずみが発生することを確認した. そしてその結果を踏まえ、ヒンジ 部コンクリートの影響を考慮できるメナーゼヒンジの設計法として、ファイバー要素を用いた立体解析に よる手法と断面解析による手法を提案した. そして、提案手法を用いることで、実験供試体のメナーゼヒ ンジで確認された最大抵抗モーメントおよび回転剛性の算定が可能であることを示した.

Key Words: Mesnager hinge, concrete hinge, seismic design code, cyclic loading test

1. はじめに

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、その周囲の被覆コンクリート(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 リートヒンジであり¹⁾、曲げモーメントを伝達せず、せ ん断力および軸力の伝達のみが期待されている構造であ る.メナーゼヒンジを含むコンクリートヒンジの歴史的 な研究経緯は、Marx and Schachtらの論文で整理されてい るが^{21,3}、その中で、ヒンジ部コンクリートは交差鉄筋 の防食および座屈防止の観点で必要であることが示され ている.

一方で、Parson and Stang⁴はヒンジ部コンクリートがメ ナーゼヒンジの曲げ剛性を増加させる点を指摘している。 現在我が国で採用されているメナーゼヒンジでは、

Parson and Stangが検討対象としたメナーゼヒンジよりも ヒンジ部コンクリートの幅が広いため、ヒンジ部コンク リートがメナーゼヒンジの力学特性に与える影響は大き いと考えられる.事実,名神高速深草高架橋橋脚の下部 メナーゼヒンジ部を抜き出した実スケール試験体に対し て筆者らが実施した正負交番載荷実験において、ヒンジ 部コンクリートを有するメナーゼヒンジに抵抗モーメン トが発生している様子が確認されている^{5,6,7}. 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 して、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 の回転剛性および抵抗モーメントは小さいとみなせると 規定されている⁹. また、兵庫県南部地震では、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.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⁹. 以上の背景から、メナ ーゼヒンジを有する部材の耐震安全性の照査を行う際は、 ヒンジ部コンクリートの影響を考慮した検討を行うべき であるといえる.

そこで本研究では、ヒンジ部コンクリートの影響をメ ナーゼヒンジの設計法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)~7))での実験結 果を参考に、ヒンジ部コンクリートがメナーゼヒンジの 力学特性に与える影響について検討する.

2. 現行の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 [®]では、メナーゼヒンジに作用する軸 カ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、応 力の制限値は交差鉄筋の降伏応力に関する値であり、降 伏応力に部分係数をかけることで算出される.また、交 差鉄筋に作用する応力は、Parson and Stang[®]によって提案 された理論的解法に対して、内山¹⁰が誘導した計算式を 簡略化した以下の式から算出される.

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

$$\sigma_{yd} = \xi_1 \Phi_y \sigma_{yc} \tag{2}$$

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_{sd} は交差鉄筋の圧縮応力度の制限値、 ξ_{1} は調査・解析係数、 σ_{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おり、交差鉄筋の基部が三角ト ラスを形成しているものと仮定している。そのため、交 差鉄筋の軸圧縮力のみでメナーゼヒンジ部に作用する軸 力とせん断力に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が前提となっている。しか し、実際にはヒンジ部断面には曲げひずみが発生してい る可能性が考えられ、中立軸がヒンジ部コンクリートの 圧縮縁側に位置することで、交差鉄筋に引張ひずみが発 生している恐れがある。

(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以下の範囲においては、メナーゼヒンジに生じる曲げモ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^{9,0,7,9}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法にヒンジ部が示す最大抵抗モーメントおよび曲げ剛性に関する照査を取り入れるべきであるといえる.また、道路橋支承便覧では、「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も記述されていない.そのため、緩衝ゴムに関する検討も併せて必要であるといえる.

3. 正負交番載荷実験概要

(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力学 特性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、文献5)~7)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、以下にそれぞれの供試体の詳細および材料特性を示 す.

a) SD5

ヒンジ部コンクリートを有さず,5組の交差鉄筋 (D22SD345)のみを柱基部に配置した供試体である.

b) SD5-Co

5組の交差鉄筋 (D22SD345) と断面160mm×1000mm,高 さ20mmのヒンジ部コンクリートで構成されたメナーゼ ヒンジを柱基部に有した供試体である.この供試体では、 ヒンジ部コンクリートの有無がヒンジの力学特性に与え る影響について考察する.

c) SD2-Co

2組の交差鉄筋 (D22SD345) と断面160mm×400mm,高 さ20mmのヒンジ部コンクリートで構成されたメナーゼ ヒンジを柱基部に有した供試体である. ヒンジ部におけ る交差鉄筋比はSD5-Coと等しくなっており,SD5-Coと 比較することで,ヒンジ部コンクリートの断面寸法およ び交差鉄筋の個数がヒンジ部の性能に与える影響につい て考察する.

d) SD5-Co-Ru

5組の交差鉄筋 (D22SD345) と断面160mm×1000mm,高 さ20mmのヒンジ部コンクリートで構成されたメナーゼ ヒンジを柱基部に有し、ヒンジ部の隙間に緩衝ゴムが設 置されている供試体である.この供試体では、緩衝ゴム の設置がヒンジの力学特性に与える影響について考察す る.

e) SR5-Co

5組の交差鉄筋 (φ22SD345) と断面160mm×1000mm,高 さ20mmのヒンジ部コンクリートで構成されたメナーゼ ヒンジを柱基部に有した供試体である.この供試体では、 交差鉄筋とヒンジ部コンクリートとの付着特性がヒンジ の力学特性に与える影響について考察する.

f) 材料特性

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に使用した鉄筋に対 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) 載荷パターン

載荷パターンは正負交番変位漸増方式を採用し,各供 試体に対し適宜載荷振幅を設定し載荷を行った.ここで, 各供試体における載荷サイクルを図-2に示す.なお, SD5-Co-Ruの載荷中,回転角が0.02radに達したときフー チング部にひび割れが発生し,回転角0.025radの載荷時 にそのひび割れによる損傷が顕著になった.フーチング 部に顕著な損傷が発生すると,メナーゼヒンジの力学特 性が検討できないため,回転角0.025radで載荷を一時中 断し,フーチングの補強を行った後,再度載荷を行った. また載荷軸応力は全ての供試体で1.2MPaとした.

(3) 測定データ

アクチュエータに設置されているロードセルにより供 試体の載荷位置における復元力及び軸力を測定した.ま た,供試体の載荷位置に設置したワイヤ式変位計により, 供試体の載荷位置における水平変位を計測し,その値を 載荷高さで除することでヒンジ部の回転角を算定した. また,ひずみゲージを貼付することにより,柱高さ0mm における交差鉄筋のひずみを測定した.



図-2 載荷サイクル

4. 実験結果及び考察

(1) 抵抗モーメントー回転角関係

各供試体の抵抗モーメントー回転角関係およびモーメ ントー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-4*効果による抵抗モーメント低下を取り除い ている.図-3より,ヒンジ部コンクリートがないSD5で は,ヒンジ部が示す最大抵抗モーメントは7.37kNmであ り,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.

一方, ヒンジ部がヒンジ部コンクリートと交差鉄筋で 構成されたSD5-Co, SR5-Co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ており,回転角0.05rad までの最大抵抗モーメントはSD5-Coで 99.3kNm, SR5-Co で92.5kNmであり,ヒンジ部コンクリートがないSD5の 約13倍であった.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規定している現行 のメナーゼヒンジの設計は,実際の挙動を正しく捉えて いないと判断できる.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.

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1.6倍の差異が確認できる.そのた め、ヒンジ部に設置した緩衝ゴムはヒンジ部が示す最大 抵抗モーメントに影響を与えることがわかった.しかし ながら、回転角0.02radのときのヒンジ部の抵抗モーメン トを比較すると、SD5-Coで93.9kNm、SD5-Co-Ruで 99.7kNmであった.また、回転角0.02radまでの回転剛性 も概ね一致していることから、両供試体の回転角一抵抗 モーメント関係に大きな差異はないと判断できる.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ー回転角関係を図-3(g)に算出した. 図より,メナーゼヒンジ1組当たりの最大抵抗モーメン トはSD5-Coで19.9kNm, SD2-Coで18.2kNmと概ね一致し ている.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.



図-3 抵抗モーメントー回転角関係



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)

(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.交差鉄筋ひずみは柱高さ0mm付近の交差鉄 筋に貼付したひずみゲージから得られた測定値の平均と しており,回転角0.02radまでの値とデータ欠損が生じる までの値をそれぞれ図示している.ここで,2.(1)で述 べたように,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関する照査の際、ヒンジ部コンクリ ートの存在が無視されているため、交差鉄筋が三角トラ スを形成して軸圧縮変形することが前提となっている. しかし、ヒンジ部コンクリートを有さないSD5では(図-4(a),(f))、交差鉄筋に曲げひずみが発生している.

さらに、ヒンジ部コンクリートを有する供試体 (SDS-Co, SD2-Co, SR5-Co, SD5-Co-Ru)では、SD5同様、交差 鉄筋に曲げひずみが発生していることに加え、軸ひずみ が引張の値となっており、その値は降伏値を大きく上回 っている.これは、ヒンジ部コンクリートが存在するこ とで、曲げ変形の中立軸が圧縮縁側に移動したことが要 因であると考えられる.このことから、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、実際の挙動を正しく捉えて いないと判断できる.

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 (SD5-Co, SD2-Co, SD5-Co-Ru) に比べ て交差鉄筋ひずみの値が小さい.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の 抵抗モーメントに差異が生じたと考えることができる.

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,モーメントー回転角関係 と同様,本供試体においては,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4.(1)で述べたSD2-CoとSD5-Coの回転剛性の差異の 要因であると考えられる.

5. ヒンジ部コンクリートの影響を考慮したメナ ーゼヒンジの設計法の提案

(1) 現行のメナーゼヒンジの設計法における問題点と 本章での検討の概要

2.で述べたように、現行のメナーゼヒンジの設計法では、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 と規定されている.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いないことが明 らかになった.そのため、ヒンジ部コンクリートの影響 を反映させたメナーゼヒンジの設計法が必要であるとい える. 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に対してこれらの 提案手法を適用し、メナーゼヒンジが示す抵抗モーメン トー回転角関係を算定することで、提案手法の妥当性を 検討する.その際、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 は期待していない.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抵抗モーメント -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抵抗モーメント - 回転角関係を算定 する.

また、現行の設計では、交差鉄筋の圧縮降伏点をメナ ーゼヒンジの限界状態と定義しているが、本実験により 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明らかになった。そのため本検 討では、交差鉄筋の引張降伏点を算出し、その点をメナ ーゼヒンジの限界状態と定義することで、メナーゼヒン ジの許容回転角を算定する。なお、ヒンジ部コンクリー トの影響を考慮した検討を行う際、ヒンジ部コンクリー トの圧壊も併せてメナーゼヒンジの限界状態とするべき であると考えられるが、本検討ではヒンジ部コンクリー トの圧壊を限界状態とは定義していない。その理由は 5.(3)にて述べる.

(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(手法 A)

筆者らは先行研究⁷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およ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=(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=(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(図-6).

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,





図-6 交差鉄筋・コンクリート間の付着劣化を考慮するた めの交差鉄筋の交差高さの設定

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.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、本モデルではメナーゼヒンジ部が示す回転性能 に着目するため、柱部および柱部・交差鉄筋間の連結部 材には剛な要素を用い、交差鉄筋およびヒンジ部コンク リートにのみファイバー要素を用いる.

また,各節点の拘束条件については、ヒンジ部コンク リートを構成する節点の内,柱高さ0mmに位置する節点 を完全固定とする.交差鉄筋を構成する節点については, 交差鉄筋下端に位置する節点を完全固定とする.そして, 変形が進むにつれてヒンジ部コンクリートと交差鉄筋の 位置関係が水平にずれないように,柱高さ0mmに位置す る節点の水平方向の変位を拘束し,鉛直・回転変位のみ 自由とする.

b) 断面解析による手法(手法B)

Leonhardt and Reinmann¹¹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-7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.

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

$$\theta = \frac{\Delta s}{r} = \frac{1}{r} \cdot s \cdot \varepsilon_R = s \cdot \varphi \tag{4}$$

ここで、Ke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,Eoはコンクリート のヤング係数, mは荷重偏心率(m=M(Na)), ωは継手断 面の曲率, rは継手部断面の圧縮縁から中立軸までの距 離, εκは継手部断面の圧縮縁におけるひずみである. す なわちLeonhardt and Reinmannは、式(3)および式(4)から、断 面解析により継手断面のM-@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 θ=φs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、曲率の 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-シー ルドトンネル¹²⁾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 定することを規定している.その際,曲率*q*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*r* の2倍と仮定している.回転角の増大に伴い継手部断面 の圧縮縁から中立軸までの距離は小さくなるため,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.

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-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-q*関係を算出し、 *qと*のの関係を以下のように仮定することで、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.



図-7 コンクリート継手断面の変形と応力

$$\theta = s \cdot \varphi = \begin{cases} 2a \cdot \varphi & (a \le r) \\ \\ 2r \cdot \varphi & (a \ge r) \end{cases}$$
(5)

ここで、 θ は回転角、aは継手面の長さ、sは圧縮応力の 影響範囲、 φ は継手断面の曲率、rはヒンジ部断面の圧 縮縁から中立軸までの距離である.なお、 $a \leq r$ において s=2aとしたのは、中立軸がヒンジ部断面の外にある場 合にr=aとみなしているためである.

(3) 提案手法で用いた材料特性について

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/mm²および199200N/mm²とした.なお、 鉄道構造物等設計標準・同解説-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.

また、一般的にメナーゼヒンジにおけるヒンジ部コン クリートの高さは断面幅に対して小さく、載荷軸力によ る軸圧縮下でフーチング上面および切り欠き隅角部で拘 束されている.そのため、ヒンジ部コンクリートは強い 拘束力を受けていると考えられ、通常のコンクリートの 場合と比較し応力低下が緩やかになる可能性が考えられ る.また、コンクリートの限界ひずみに関しても、無拘 束時には圧壊時のひずみを3500µ程度とする場合が多い が、強い拘束を受けているヒンジ部コンクリートにはこ の値は適用できない.以上から、ヒンジ部コンクリート における応力低下勾配や圧壊時ひずみを正確に評価する ことは困難であると考え、本検討ではコンクリートの最 大圧縮応力は30.0MPa、最大圧縮応力時ひずみを0.002と して、それ以降は応力が一定となるモデルを用いた.し かしながら、ヒンジ部コンクリートの圧壊点の算出はメ ナーゼヒンジの照査を行う上で重要であると考えられ、 ヒンジ部コンクリートに適用する応力-ひずみ関係には 検討の余地があるといえる.

(4) ヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジの 抵抗モーメントー回転角関係の算定

a) ファイバー要素を用いた立体解析による手法(手法 A)

図-8に手法Aにより算定された抵抗モーメントー回転 角関係を示す.図より、手法Aによる最大抵抗モーメン トの算定値は, SD5-Coで88.6kNm (算定値 / 実験値 =0.893(正側), 1.02(負側)), SD2-Coで35.6kNm (算定値/実 験値=0.978(正側), 1.09(負側))となり、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 できていると判断できる. 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.一方, SD2-Coにおいては、実験で得られた回転剛性は、付着 喪失を仮定した場合における回転剛性と同程度の値であ る. そのため、 SD5-Coに比べてSD2-Coでは交差鉄筋の 影響が顕著であったと判断でき、これは4.(2)での考察と 同様の結果である.以上から,提案手法を用いることで, 本実験供試体におけ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.

また、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0.0031radと算定された. こ れらの値は実験で得られた交差鉄筋の降伏点(SD5-Co: 0.016rad, SD2-Co: 0.034rad)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う. 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 態と定義して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、付着喪失 を仮定して算出した交差鉄筋の引張降伏点 (SD5-Co: 0.027rad, SD2-Co: 0.027rad) 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.



図-8 提案手法により算定した抵抗モーメントー回転角関 係

b) 断面解析による手法(手法B)

図-8に手法Bにより算定された抵抗モーメントー回転 角関係を示す.図より,手法Bによる最大抵抗モーメン トの算定値は,SD5-Coで90.8kNm(算定値/実験値 =0.913(正側),1.04(負側)),SD2-Coで36.2kNm(算定値/実 験値=0.994(正側),1.11(負側))となり,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 できていると判断できる.一方,回転剛性は実験値より も過大に算出されている.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 ると考えられる.しかしながら,手法Bではθとφに関し て式(5)に示す関係を与えることでヒンジ部での過度な 変形集中を緩和しているため,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 較すると算定値と実験値との差異が小さくなっている. 以上から,手法B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での完全付 着仮定時におけ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の算定値は、SD5-Coで 0.013rad (算定値/実験値=0.81)となっており、実験値を概 ね再現できている.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、算定値は 0.013rad (算定値/実験値=0.39)であり、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.しかし、この結 果はメナーゼヒンジの許容回転角を安全側に評価してい ると捉えることもでき、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はいないといえる.

6. メナーゼヒンジ部の構造の変化がヒンジ部の 力学特性に与える影響について

(1) 本章での検討の概要

本章では、5.で提案した手法を用いて、ヒンジ部コン クリート幅の影響やメナーゼヒンジが示す抵抗モーメン トの内訳、交差鉄筋の配筋位置のずれの影響、SD5-Co-Ruに設置した緩衝ゴムの影響について検討を行う.

(2) ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジの力学 特性に与える影響について

本節では、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、 SD5-Coに倣って交差鉄筋はD22を10本(5組)とし、ヒンジ 部コンクリート断面の奥行は1000mmとした.図-9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.図より、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



図-9 ヒンジ部コンクリート幅が抵抗モーメントー回転角 関係に与える影響

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るべきであるといえる.

(3) メナーゼヒンジが示す抵抗モーメントの内訳

手法Aを用いて算出した、ヒンジ部コンクリート断面 が幅160mm×奥行1000mm, 交差鉄筋がD22×10本(5組)で あるメナーゼヒンジが示す抵抗モーメントの内訳を図-10に示す. 図より、メナーゼヒンジが示す抵抗モーメ ントへの交差鉄筋の寄与分は小さく、その大部分がヒン ジ部コンクリートによるものであることがわかる.また, ヒンジ部に交差鉄筋のみ、またはヒンジ部コンクリート のみを配置した場合の抵抗モーメント(図-11)と比較する と、メナーゼヒンジが示す抵抗モーメントは、単に交差 鉄筋のみの場合とヒンジ部コンクリートのみの場合の抵 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. 特に、メナーゼヒンジの抵抗モーメントへのヒン ジ部コンクリートの寄与分が、ヒンジ部コンクリートの みを配置した場合の抵抗モーメントと比べ大きくなって いる.これは、ヒンジ部コンクリートが交差鉄筋と組み 合わさることで交差鉄筋が引張鉄筋として作用するため、 ヒンジ部コンクリートに作用する圧縮力が増大するため である(図-12).

この結果からも、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





図-11 ヒンジ部に交差鉄筋のみ、またはヒンジ部コンク リートのみを配置した場合の抵抗モーメント



係 (引張 : 正)

ートと交差鉄筋を組み合わせることによりメナーゼヒン ジが示す抵抗モーメントを評価する必要があるといえる.

(4) 交差鉄筋の配筋位置のずれとメナーゼヒンジの最 大抵抗モーメントの関係

図-3を見ると、SD5-Coで12.2kN、SD5-Co-Ruで32.1kN、 SR5-Coで30.3kN程度、正載荷時と負載荷時の最大抵抗モ



ーメントに差異が確認できる.この理由に関しては,交 差鉄筋の配筋位置の誤差,材料特性のばらつき,載荷履 歴の影響など様々な理由が考えられる.そこで本項では, 上述した要因の中でも交差鉄筋の配筋位置のずれがメナ ーゼヒンジの抵抗モーメントに与える影響に関して,手 法Bを用いて検討を行った.その際,SD5-CoおよびSR5-Coの断面を対象とした.

図-13に交差鉄筋の配筋位置を変化させたときのメナ ーゼヒンジが示す抵抗モーメント回転角関係を示す.図 より,交差鉄筋の配筋位置が0.25Dずれると正側と負側 で最大抵抗モーメントに16.5kNの差異が生じ,0.5Dずれ ると33.0kNの差異が生じることがわかる.よって,実験 で確認された程度の正負の最大抵抗モーメントの差異は, 交差鉄筋の配筋位置が0.5D程度ずれることで生じること が示された.もちろん,実際の交差鉄筋の配筋位置を詳 細に確認できていないため,本実験での正負の最大抵抗 モーメントに差異が交差鉄筋の配筋位置のずれによるも のであるとは断言できない.しかしながら,0.5D程度の ずれにより正負で33.0kNの差異が生じることから,交差 鉄筋の配筋位置のずれとメナーゼヒンジの最大抵抗モー メントの変化の関係は、メナーゼヒンジの回転性能を検 討する上で留意すべき点であるといえる.

(5) 緩衝ゴムがメナーゼヒンジの力学特性に与える影響について

a) 本検討で用いた解析モデルについて

本項では、SD5-Co-Ruに設置した緩衝ゴムがメナーゼ ヒンジの力学特性に与える影響について考察することを 目的として、手法Aを用いてSD-Co-Ruにおける抵抗モー メントー回転角関係および交差鉄筋の引張降伏点の再現 を試みる.その際、緩衝ゴムはヒンジ部コンクリートと 同一断面に配置してファイバー要素としてモデル化した. なお、本検討で手法Aを用いる理由は、手法Bでは式(5) によるヒンジ部での変形集中を緩和しているため、本来 ヒンジ部でのみ発生している緩衝ゴムの変形が不自然に 高さ方向に平滑化されてしまうためである.

また、本検討では緩衝ゴムは圧縮力のみ発揮する線形 要素としてモデル化したが、その際、縦弾性係数に関し て材料試験結果等がなく、正確な値は得られなかった. そこで本検討では、道路橋支承便覧[®]に記載されている 服部・武井の式¹³⁾を用いてゴムの縦弾性係数をE=16.04 N/mm²と算定した.ここで、長方形断面のゴムに対する 服部・武井の式およびその際に用いる長方形ゴムの一次 形状関数を式(6)、式(7)に示す.

$$E = \left(4 + \frac{1}{3}\pi^2 S_1^2\right)G$$
 (6)

$$S_1 = \frac{\min\left(a, b\right)}{2t_e} \tag{7}$$

ここに、Eはゴムの縦弾性係数、 S_1 はゴムの一次形状係数、Gはゴムのせん断弾性係数、aはゴムの橋軸方向の寸法、bはゴムの橋軸直角方向の寸法、 $\min(a,b)$ はa,bのうち小さい値、 t_a はゴムの厚さである。ここで、ゴムの寸法は図-1に示すようにa=70mm、b=1000mmとし、せん断弾性係数に関しては、メナーゼヒンジ用B種ゴム支承として使用されているSBRイタ道路公団B種の一般物性値を参考としてG=1.18N/mm²とした。

b) SD-Co-Ruの抵抗モーメントー回転角関係の算定

図-14に手法Aで算出したSD5-Co-Ruの抵抗モーメント ー回転角関係を、図-15にその抵抗モーメントの内訳を 示す.図-14より、正載荷側の最大抵抗モーメントの実 験値が過小に算定されている.これは、6.(4)で述べた正 負の抵抗モーメントの差異が生じる要因の他に、緩衝ゴ ムを線形でモデル化したため、変形に伴うゴムのハード ニングによる影響を適切に表現できていない可能性が考 えられる.また、本検討で用いた服部・武井の式は、側 面の拘束がないゴムに対して導出されているが、メナー ゼヒンジに設置した緩衝ゴムは、側面のうち一面がヒン ジ部コンクリートで拘束されている.そのため、ゴムの 縦弾性係数が過小に算出されている可能性がある.

しかしながら,交差鉄筋の引張降伏点から算定された メナーゼヒンジの許容回転角については,交差鉄筋の付 着喪失を仮定した場合の算定値が実験値を概ね再現でき ており,その点までの抵抗モーメントー回転角関係には 算定値と実験値で大きな差異は見られない.よって,緩 衝ゴムの材料特性の設定に関して検討の余地はあるもの の,交差鉄筋の引張降伏点までの変形領域であれば,緩 衝ゴムを有するSD5-Co-Ruの抵抗モーメントー回転角関 係の算出が可能であった.

ここで, SD5-Co-Ruの抵抗モーメントの内訳を見ると (図-15), 許容回転角程度の変形領域 である回転角0.02rad





時では、緩衝ゴムによる抵抗モーメントの寄与分は完全 付着仮定時で12.0kNm (全体の12.3%),付着喪失仮定時で 10.9kNm (全体の12.3%)であった.一方で、回転角0.02rad 時のヒンジ部断面のひずみ分布を見ると(図-16),緩衝ゴ ムの設置によるヒンジ部コンクリートのひずみの変化は 見られない.以上から、交差鉄筋の引張降伏点までの変 形領域であれば、緩衝ゴムはヒンジ部の抵抗モーメント に約10%程度寄与するものの、ヒンジ部の変形に与える 影響は小さいと判断できる.

また回転剛性に関しても、実験で得られた値が完全付 着を仮定した場合と付着喪失を仮定した場合の間の値と なっている.よって、緩衝ゴムがある場合でも、手法A



(回転角:0.02rad)

を用いることで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.

7. まとめ

本研究では、ヒンジ部コンクリートの影響をメナーゼ ヒンジの設計法に反映させることを目的として、先行研 究での実験結果を基に、ヒンジ部コンクリートがメナー ゼヒンジの力学特性に与える影響について検討した.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、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。
- ヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジでは、交差鉄筋に引張ひずみが発生することが明らかとなった。そのため、交差鉄筋に圧縮変形が生じることを前提として作用軸力とせん断力に対する照査を行っ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供試体において、メナーゼビ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、ヒンジ部の力学特性に影響を与えなかった。
- 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交差鉄筋に発生 する引張ひずみが軽減され、ヒンジ部の回転剛性

が小さくなった.

- ファイバー要素を用いた立体解析を行うことで、
 本実験供試体のメナーゼヒンジの最大抵抗モーメントが算定可能であった.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することができた.
- 断面解析を用いた検討を行うことで、本実験供試体のメナーゼヒンジの最大抵抗モーメントを算定可能であった。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。
- 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することができた。
- 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。
- メナーゼヒンジが示す抵抗モーメントへの交差鉄
 筋の寄与分は小さく、その大部分がヒンジ部コン クリートによるものであることがわかった.これ
 は、ヒンジ部コンクリートが交差鉄筋と組み合わ さることで交差鉄筋が引張鉄筋として作用するた
 め、ヒンジ部コンクリートに作用する圧縮力が増 大することが要因であった.
- 本研究で対象とした供試体において、交差鉄筋の 配筋位置が0.5D程度ずれることで、ヒンジ部の抵 抗モーメントが正負で33.0kNの差異が生じること がわかった.このことから、交差鉄筋の配筋位置 のずれとメナーゼヒンジの最大抵抗モーメントの 変化の関係は、メナーゼヒンジの回転性能を検討 する上で留意すべき点であるといえる.
- 緩衝ゴムがメナーゼヒンジの力学特性に与える影響をファイバー要素を用いた立体解析により検討した.その結果、本実験供試体では、交差鉄筋の引張降伏点までの変形領域であれば緩衝ゴムがヒンジ部の変形に与える影響が小さいことを示した.また、緩衝ゴムがある場合でも、交差鉄筋の引張降伏点までの変形領域であれば、ヒンジ部が示す抵抗モーメントおよび回転剛性が算定可能であった.

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

- Mesnager, A. : Experiences sur une semi-articulation pour voutes en Béton armé, Annales de Ponts de Chaussees, 2, pp.180-201, 1907.
- Marx, S. and Schacht, G. : Concrete hinges historical development and contemporary use, 3rd Fib International Congress, pp.10-16, 2010.
- Schacht, G, Marx, S. : Proceedings of the Institution of Civil EngineersEngineering History and Heritage, Vol.168, Issue. EH2, pp.64-74, 2015.
- Parsons, D.E., Stang, A.H. : Test of Mesnager hinges, Journal of the American Concrete Institute, Vol.31, Issue.1, pp.304-325, 1935.
- Ahmed,R.A., 高橋良和, 枦木正喜: 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.
- 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.

- 7) 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.
- 8) 日本道路協会:道路橋支承便覧, 2018.12
- 9) 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.
- 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.
- 11) Leonhardt, F. and Reinmann, H. : Betongelenke, DER-BAUINGENIEUR, VOL.41, pp49-56, 1966.
- 12) 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-シールドトンネル, 1997.
- 13) 服部六郎, 武井健三: 壓縮ゴム座のバネ常數に就て, ゴム協会誌, Vol.23, No.7, pp.194-198, 1950.

INVESTIGATION ON INFLUENCE OF CONCRETE COVER IN MESNAGER HINGE ON ITS MECHANICAL PROPERTY

Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

Mesnager hinge is a concrete hinge composed of crossing reinforcing bar and cover concrete. In Japanese seismic code, the compressive yield point of crossing reinforcing bars is defined as the ultimate state of Mesnager hinges and bending moment of Mesnager hinge is assumed to be small, because influence of cover concrete in Mesnager hinge is not considered. However, Mesnager hinges commonly used in Japan have thick cover concrete compared with conventional Mesnager hinges. Thus, this study investigated the results of cyclic loading tests for Mesnager hinges with thick cover concrete carried out by our previous researchs to evaluate the influence of cover concrete in Mesnager hinge on its mechanical property. As a result, cover concrete was found to enhanced the bending moment of Mesnager hinge. Additionally, crossing reinforcing bars were subject to tensile deformation due to cover concrete. The observations contradict the assumption in Japanese seismic code. Therefore, two methods were proposed to calculate bending moment of Mesnager hinge and tensile yield point of crossing reinforcing bars. From results of numerical analysis with there methods, it is suggested that the proposed methods can evaluate the influence of cover concrete in Mesnager hinge and tensile yield poperty.