

# メナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れの発生メカニズムに関する検討

植村 佳大<sup>1</sup>・高橋 良和<sup>2</sup>・後藤 浩之<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>正会員 京都大学教授 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

<sup>3</sup>正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)  
E-mail: goto@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

メナーゼヒンジでは、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着により、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生することが知られている。しかし、現在我が国で採用されているメナーゼヒンジの多くは、従来のメナーゼヒンジと比較して幅の広いヒンジ部コンクリートを有しており、従来のメナーゼヒンジとヒンジ部の力学性状が異なる可能性がある。そこで本研究では、先行研究での実験結果を参考に、ヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れの発生メカニズムを検討した。そしてその結果を踏まえ、拡張有限要素法(X-FEM)を用いたひび割れ進展解析を実施した。その結果、曲げが作用するヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジでは、ヒンジ部コンクリートへの軸圧縮力の増大により縦方向のひび割れが発生している可能性を示した。

**Key Words:** *Mesnager hinge, crack propagation, cyclic loading test, extended finite element method*

## 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、これまでに多くの橋梁で採用されてきた<sup>2)</sup>。そのような中、Parsons and Stang<sup>4)</sup>やMorell<sup>5)</sup>は、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着によって、メナーゼヒンジ部に縦方向のひび割れが発生することを指摘している。メナーゼヒンジ部に発生する縦方向のひび割れが交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着に起因しているという知見は、メナーゼヒンジの歴史的な研究経緯がまとめられたMark and Schachtによる一連の研究<sup>2)</sup>の中でも取り上げられており、メナーゼヒンジを取り扱う上で一般的となっているといえる。そのため、我が国のメナーゼヒンジの設計法が取りまとめられている道路橋支承便覧<sup>6)</sup>においても、ヒンジ部に発生するひび割れに関して、「メナーゼヒンジの応答の繰り返しに応じて、交差鉄筋に作用する軸力がコンクリートに埋め込まれた鉄筋の付着によってコンクリートに伝達され、交差鉄筋中心付近のコンクリートにひび割れが生じる」と記述さ

れている。

しかし、現在我が国で広く採用されているメナーゼヒンジには、Parsons and Stang<sup>4)</sup>やMorell<sup>5)</sup>が検討対象としたメナーゼヒンジよりも幅の広いヒンジ部コンクリートを有しているという特徴がある。例えば、Parsons and Stang<sup>4)</sup>やMorell<sup>5)</sup>が検討対象としたメナーゼヒンジでは、ヒンジ部コンクリート幅が50.8mmであるのに対し、名神高速道路の八日市ICから西宮ICの間に存在する全1106基のメナーゼヒンジでは、ヒンジ部コンクリート幅が160mm~200mmであるメナーゼヒンジが約60%を占めている。もちろん、我が国においても、Parsons and Stang<sup>4)</sup>やMorell<sup>5)</sup>が検討対象としたメナーゼヒンジと同程度のヒンジ部コンクリート幅を有するメナーゼヒンジも中には存在する。しかしながら、上述した名神高速道路で使用されているメナーゼヒンジの例を見ても、ヒンジ部コンクリート幅が広いということが、我が国のメナーゼヒンジの大きな特徴であるといえる。そのため、我が国で広く採用されているメナーゼヒンジとParsons and Stang<sup>4)</sup>やMorell<sup>5)</sup>が検討対象としたメナーゼヒンジでは、ヒンジ部の力学性状が異なる可能性が考えられる。以上から、メナーゼヒンジ部におけるひび割れ発生メカニズムについて

も、検討の余地が残っているといえる。

そこで本研究では、先行研究(文献 7~9))での実験結果を参考に、現在我が国で広く採用されているヒンジ部コンクリートの幅が広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れの発生メカニズムを検討した。そしてその検討結果を参考に、ひび割れ進展解析を実施した。

## 2. 正負交番荷重実験概要

### (1) 実験供試体

本研究では、現在我が国で広く採用されている、ヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジ部における縦方向のひび割れの発生メカニズムを検討することを目的として、文献7~9)で実施した正負交番実験結果に関して検討を行う。

なお、対象とする実験供試体は、現在名神高速深草高架橋橋脚で供用されているメナーゼヒンジに倣って寸法が決定されており、交差鉄筋の公称直径が22.2mm、ヒンジ部コンクリートの幅が160mm、交差鉄筋のかぶり厚さが約70mmとなっている。Parsons and Stang<sup>4)</sup>やMoreel<sup>5)</sup>が検討対象としたメナーゼヒンジの交差鉄筋の公称直径が15.9mm、ヒンジ部コンクリート幅が50.8mmであり、交差鉄筋の最小かぶり厚さが約17.5mmであることを考えると、本実験供試体におけるヒンジ部コンクリート幅は従来のメナーゼヒンジに比べて広いと判断できる。

ここで、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-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。

#### b) 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。なお、ヒンジ部における交差鉄筋比はSD5-Coと等しい。

#### c) SR5-Co

5組の交差鉄筋 (φ22SD345の丸鋼) 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部のひび割れ性状に与える影響について考察する。

#### d) 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30.1 N/mm<sup>2</sup>、それ以外の試験体では30.0 N/mm<sup>2</sup>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/mm<sup>2</sup>、降伏応力386.9N/mm<sup>2</sup>、SD345-D13のヤング率を195100N/mm<sup>2</sup>、降伏応力390.5N/mm<sup>2</sup>と算出した。なお、SD2-Co以外の供試体に使用した鉄筋については引張試験が実施されておらず、鉄筋の材料特性は得られていない。

### (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、各供試体に対して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。また荷重軸応力は全ての供試体で1.2 N/mm<sup>2</sup>とした。

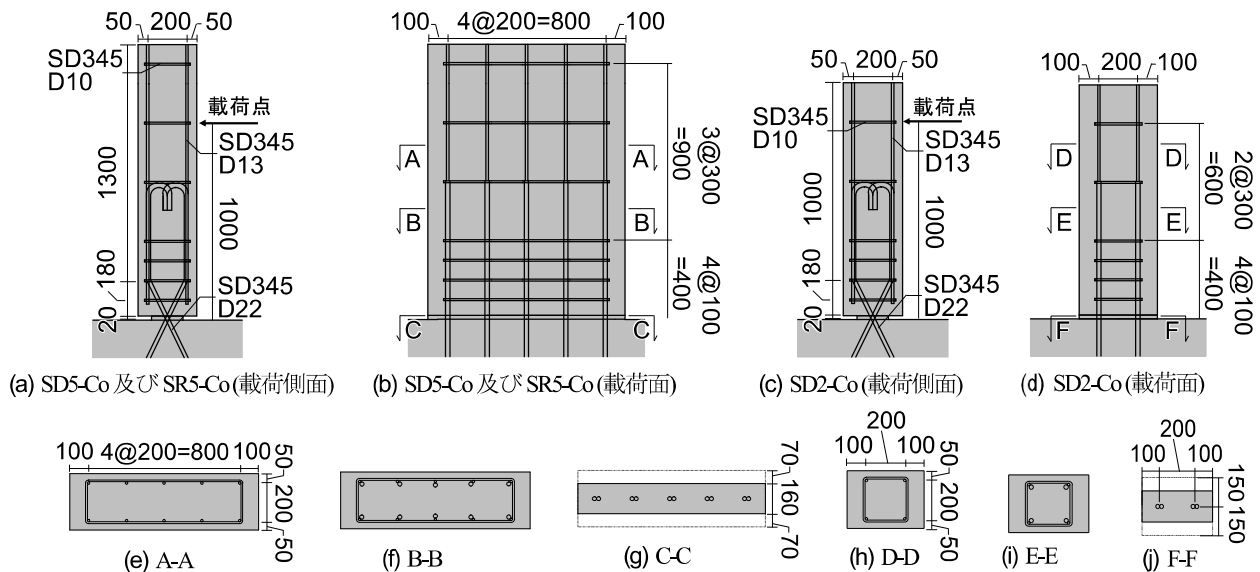


図-1 供試体の配筋図

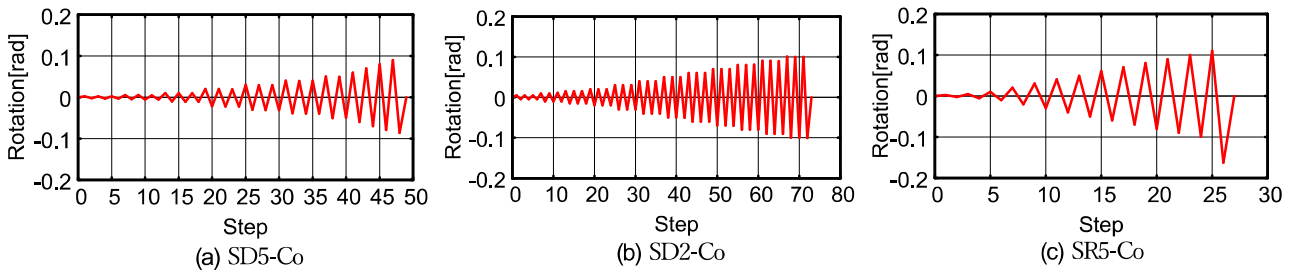


図-2 荷重サイクル

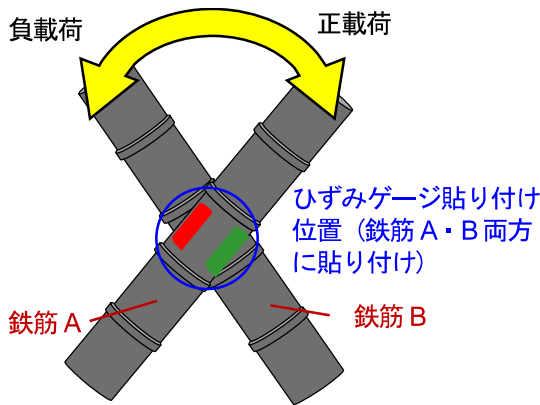


図-3 ひずみゲージ貼り付け位置の概略図

### (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荷重位置における復元力および軸力を測定した。また、供試体の荷重位置に設置したワイヤ式変位計により、供試体の荷重位置における水平変位を計測し、その値を荷重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。なお、ひずみゲージは交差鉄筋において対となる2本の鉄筋両方に添付した。その際、ひずみゲージ貼り付け位置は交差鉄筋に作用する曲げによって引張圧縮が作用する上下面とした(図-3)。また、SD5-CoおよびSR5-Coでは、5組の交差鉄筋のうち両端と中央に位置する計3組の交差鉄筋を測定対象とし、SD2-Coでは2組すべての交差鉄筋を測定対象とした。

## 3. 実験結果及び考察

### (1) ひび割れ性状

#### a) SD5-Co

回転角 0.01rad までの繰り返し荷重においては、ヒンジ部の柱高さ 0mm の位置に水平ひび割れが発生するのみであった。その後、回転角 0.02rad の3回の繰り返し荷重の間に、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生・進展する

様子が確認された(図-4(a),(b))。この縦方向のひび割れは、両側の柱側面で発生しており、回転角 0.09rad 時には縦方向のひび割れが反対側の柱側面まで貫通している様子が確認された(図-4(c))。

#### b) SD2-Co

回転角 0.03rad までの繰り返し荷重においては、0mm の位置に水平ひび割れが発生するのみであった。その後、回転角 0.04rad の3回の繰り返し荷重の間に、南側の柱側面において、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生・進展する様子が確認された(図-5(a),(b))。一方、北側の柱側面では、ヒンジ部から縦方向のひび割れは発生せず、回転角 0.06rad 時に荷重面・荷重面裏側の北側に縦方向のひび割れが発生した。これは、ヒンジ部コンクリート内部で発生したひび割れが、北側の柱側面表面には貫通せず、荷重面・荷重面裏側に貫通したためであると考えられる(図-5(c),(d))。

#### c) SR5-Co

回転角 0.10rad までの繰り返し荷重においては、0mm の位置に水平ひび割れが発生するのみであった。その後、回転角 0.11rad の繰り返し荷重の際に、南側の柱側面においてヒンジ部に縦方向のひび割れが発生・進展する様子が確認された(図-6(a))。その後、図-2(c)に示すように、回転角が 0.16rad となるまで負方向に片押しの単調荷重を実施したところ、回転角 0.12rad 時に北側の柱側面においても縦方向のひび割れが発生した(図-6(b))。なお、SR5-Co では、他の供試体と違い、荷重側面の縦方向のひび割れが東側しか発生しなかった。これは、SR5-Co では負方向には回転角が 0.16rad となる変形領域まで荷重を行った一方で、正方向には回転角が 0.11rad 以上となる変形を加えなかったためであると考えられる。

#### d) まとめ

1.で述べたように、道路橋支承便覧では、縦方向のひび割れは交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着により発生すると記載されている。しかし、図-4、図-5、図-6より、本実験で確認された縦方向のひび割れは、ヒンジ部コンクリートの隅角部付近から発生しており、鉄筋に沿って進展していないことがわかる。さらに交差鉄筋に丸鋼を用いた SR5-Co においてもひび割れが発生していることから、縦方向のひび割れが交差鉄筋とヒンジ部コ

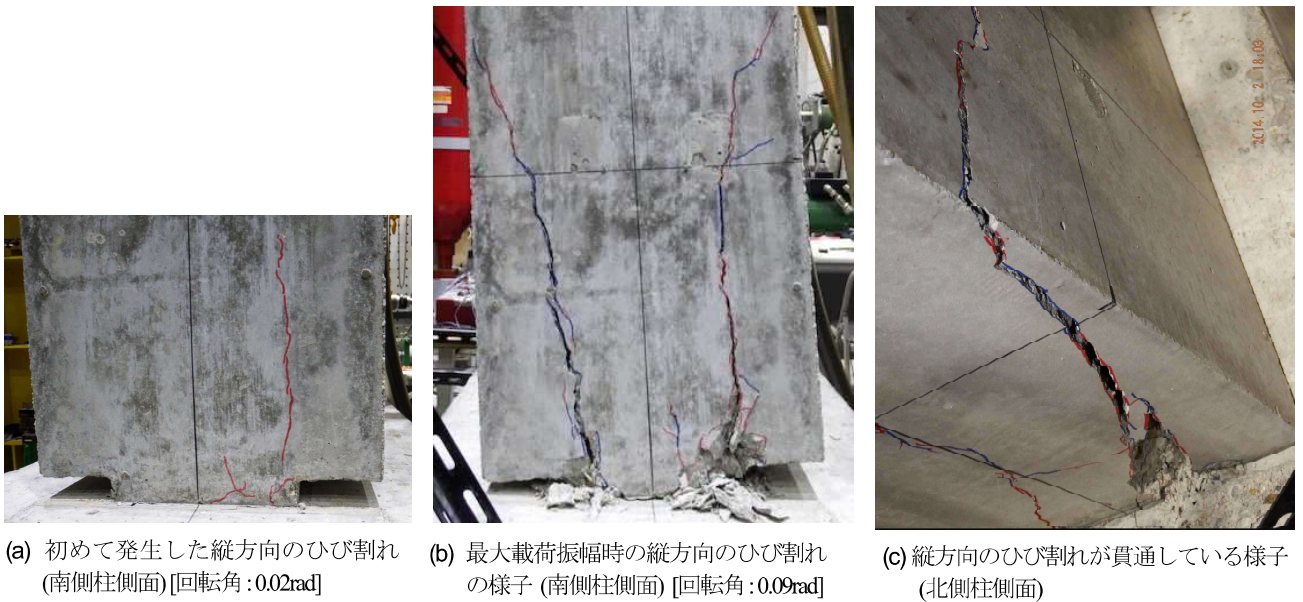


図4 ヒンジ部コンクリートから発生した縦方向のひび割れとそのときのヒンジ部の回転角 (SD5-Co)

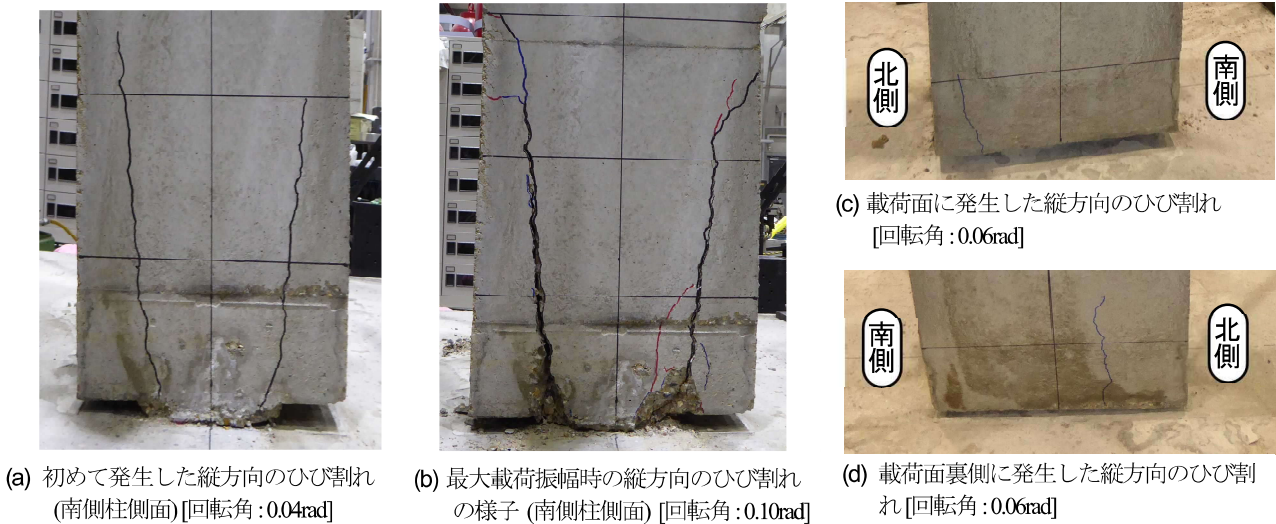


図5 ヒンジ部コンクリートから発生した縦方向のひび割れとそのときのヒンジ部の回転角 (SD2-Co)

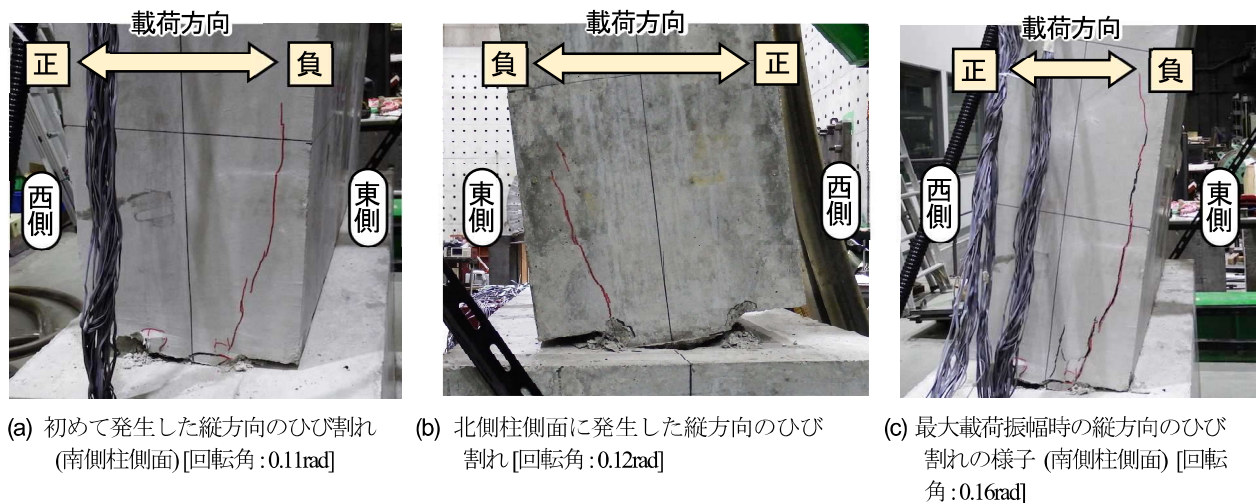


図6 ヒンジ部コンクリートから発生した縦方向のひび割れとそのときのヒンジ部の回転角 (SR5-Co)

ンクリートの付着によって発生したとは考えにくい。そのため、本実験で確認された、ヒンジ部コンクリート幅が広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れは、道路橋支承便覧に記載されているひび割れ発生メカニズムと異なるメカニズムで発生したと考えられる。

## (2) 交差鉄筋のひずみ

柱高さ0mmにおける交差鉄筋ひずみと回転角の関係に関して、回転角0.02radまでの値とデータ欠損が生じるまでの値を図-7に示す。なお図-7では、交差鉄筋において対となる2本の鉄筋のうち、データ欠損の少なかった鉄筋(図-3の鉄筋A)のひずみを図示している。また、2.(3)で述べたように、SD5-CoおよびSR5-Coでは両端と中央に位置する計3組の交差鉄筋のひずみを、SD2-Coでは2組すべての交差鉄筋ひずみを測定したが、図-7ではそれらの交差鉄筋ひずみの平均を示している。

図-7より、いずれの供試体においても、交差鉄筋には引張ひずみが発生しており、その値は回転角の増大に伴い増加している。

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)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

鉄筋の付着がフーチングおよび柱内部で早期に喪失したため、交差鉄筋ひずみが高さ方向に平均化されたことが原因であると考えられる。

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る。

## (3) ヒンジ部コンクリートから発生する縦方向のひび割れの発生メカニズムについて

3.(1), 3.(2)での検討結果から、筆者らは本実験で確認されたヒンジ部コンクリートにおける縦方向のひび割れ発生メカニズムを以下のように推測した。3.(2)で述べたように、本実験供試体では交差鉄筋には引張ひずみが発生し、その値は回転角の増大に伴い増加している。そのため、本実験供試体では交差鉄筋に引張力が発生し、その値は回転角の増大に伴い増加していたことがわかる。ここでヒンジ部断面における力の釣り合いを考えると(図-8)、載荷軸力が一定であっても、交差鉄筋の引張力増大に伴い、ヒンジ部コンクリートへ作用する圧縮軸力が増加すると考えられる。筆者らは、このヒンジ部コンクリートへの作用軸圧縮力の増大(載荷軸力(一定)+交差

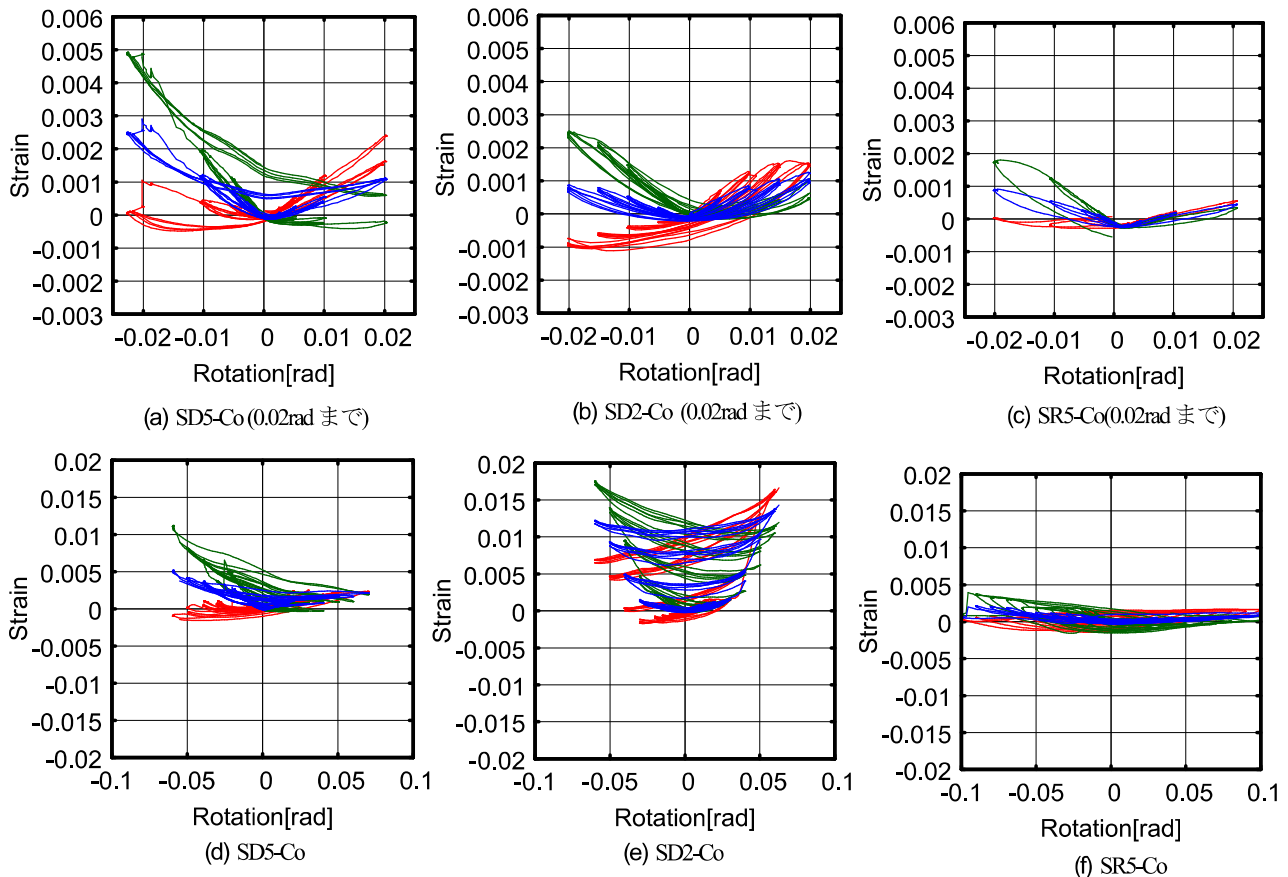


図-7 交差鉄筋ひずみ-回転角関係(赤線・緑線：断面最外縁ひずみ，青線：軸ひずみ)

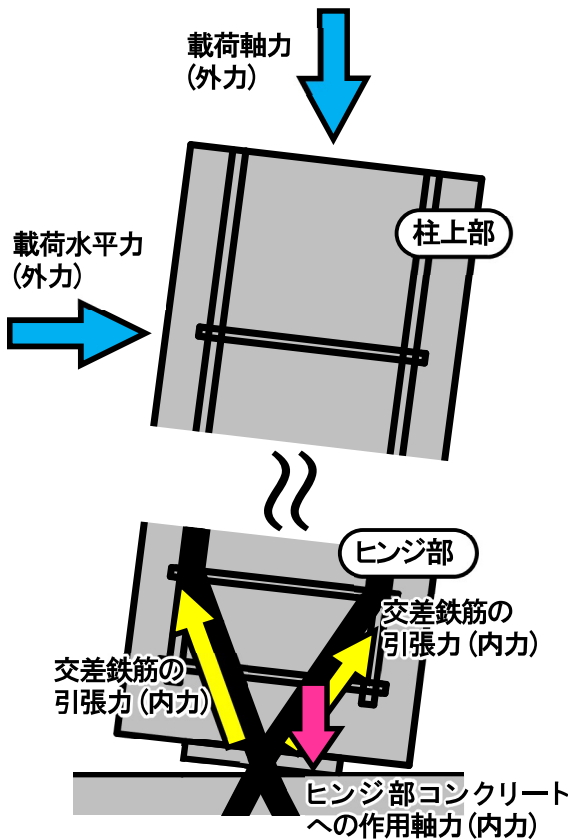
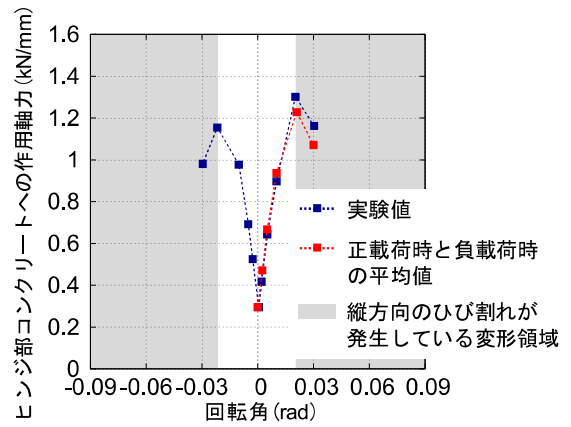


図-8 ヒンジ部断面における力の釣り合い

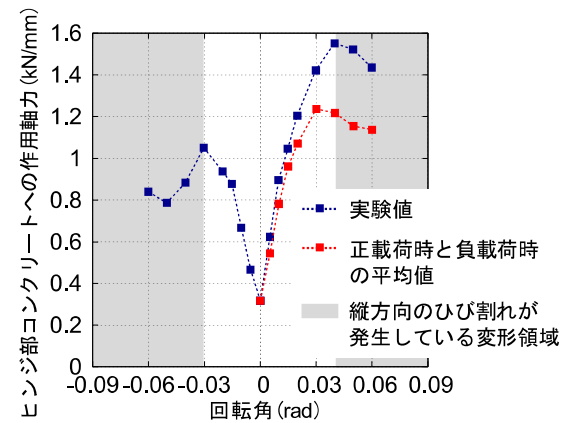
鉄筋引張力の反力(増加)が、縦方向のひび割れ発生の要因であると推測した。

そこで、図-9に各载荷サイクルの最大回転角においてヒンジ部コンクリートの単位奥行きあたりに作用する軸力(圧縮:正)を示す。ヒンジ部コンクリートの単位奥行きあたりに作用する軸力は、ヒンジ部断面の力の釣り合いから「载荷軸力+交差鉄筋が發揮した引張力」として算出したのち、ヒンジ部コンクリートの奥行(SD5-CoおよびSR5-Co:1000mm, SD2-Co:400mm)で除すことにより算出した。また、図-9において赤線で示したグラフは、図中に青線で示した正载荷時と負载荷時の実験値を平均したものである。なお、交差鉄筋が發揮した引張力は、交差鉄筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性バイリニアとし、降伏応力およびヤング率を引張試験の結果を参考に $386.9\text{N/mm}^2$ ,  $199200\text{N/mm}^2$ として算出した。

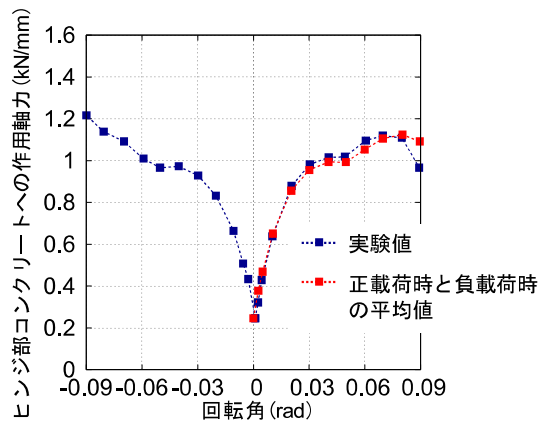
図-9(a)より、SD5-Coでは、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生した回転角 $0.02\text{rad}$ の付近で、ヒンジ部コンクリートへの作用軸力における正载荷時と負载荷時の平均値が約 $1.2\text{kN/mm}$ となっている。一方、SD2-Co(図-9(b))では、SD5-Coに比べヒンジ部コンクリートへの作用軸力の増加が緩やかであることがわかる。また、SD5-CoとSD2-Coにおいて、縦方向のひび割れの発生を機に、ヒンジ部コンクリートへの作用軸力が低下している。一方、SR5-Co(図-9(c))では、ひずみゲージのデータ欠損により、



(a) SD5-Co(縦方向のひび割れ発生: $0.02\text{rad}$ )



(b) SD2-Co(縦方向のひび割れ発生: $0.04\text{rad}$ )



(c) SR5-Co(縦方向のひび割れ発生: $0.11\text{rad}$ )

図-9 各载荷サイクルの最大回転角におけるヒンジ部コンクリートへの作用軸力(圧縮:正)

縦方向のひび割れが発生した回転角 $0.11\text{rad}$ の変形領域におけるヒンジ部コンクリートへの作用軸力が算出できなかった。そのため、縦方向のひび割れ発生時のヒンジ部コンクリートへの作用軸力について議論することはできない。しかしながら、SD5-CoおよびSD2-Coに比べ、回転角 $0.09\text{rad}$ までの変形領域における作用軸力の増加が緩やかであることが読み取れる。よって、ヒンジ部コンクリートに作用する軸力の値が大きい供試体ほど、早期に

縦方向のひび割れが発生していると判断することができる。

以上から、本実験供試体における縦方向のひび割れが、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力の増大により発生している可能性が示されたといえる。そこで、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力とヒンジ部コンクリートのひび割れ発生との関係について、4.にて詳細に検討する。

#### 4. ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力と縦方向のひび割れの関係について

##### (1) 本検討の目的

1.で述べたように、道路橋支承便覧では、ヒンジ部コンクリートに発生する縦方向のひび割れは鉄筋とコンクリートの付着により発生すると記載されている。しかし、3.での検討により、実験供試体のような幅の広いヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジでは縦方向のひび割れは鉄筋に沿って生じておらず、交差鉄筋に丸鋼を用いた場合でもひび割れが発生することがわかった。そこで筆者らは、幅の広いヒンジ部コンクリートにおける縦方向のひび割れ発生が、交差鉄筋に作用する引張力増大に伴うヒンジ部への圧縮軸力の増加によるものであると推測した。

そこで本章では、ヒンジ部コンクリートにおける縦方向のひび割れ発生メカニズムについて、拡張有限要素法(X-FEM<sup>10,11</sup>)を用いた検討を行う。その際、X-FEMで用いるエンリッチ関数には変位の不連続面が表現できるヘビサイド型の関数(shifted Heaviside function<sup>12</sup>)を用いる。なお、本章におけるひび割れ進展解析では、計算の高速化と省メモリ化を図るため、繰り返し計算が不要である動的陽解法の一つである中央差分法を用いた検討を行う。その際、陽解法である中央差分法を用いるためには質量マトリクスを対角化する必要があるが、本解析では池田ら<sup>13</sup>の方法に倣い、shifted Heaviside 関数に対して適用可能な質量集中化を行った<sup>14</sup>。

##### (2) クラックの表現

検討対象であるコンクリートの破壊は、引張による破壊が支配的であると考えられる。そこで本検討では、脆性材料の引張破壊に対する簡易的な破壊基準として知られるランキン型の破壊基準(最大主応力説)を採用する。その際、クラックが開閉する際にクラック面に働く表面力については、池田ら<sup>13</sup>による方法に倣い、粘着力がクラック開口変位に応じて徐々に低下するcohesive crack modelを用いる<sup>15,16</sup>。

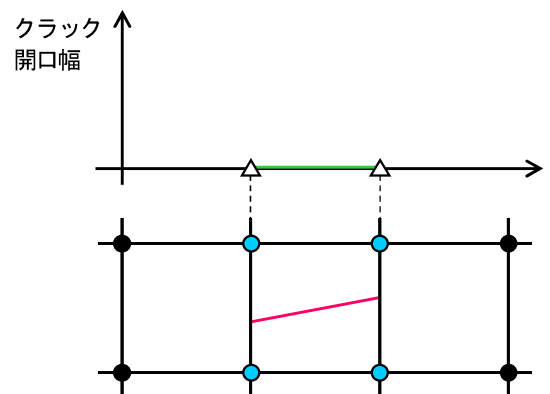
また、和田・後藤<sup>17</sup>はX-FEMを用いた変位の不連続面

の動的進展解析において、不連続面の先端を有している要素のうち、不連続面が位置している要素をMiddle state要素<sup>18</sup>と捉えて解析を行っている。そこで本検討でも、和田・後藤の手法に倣ってMiddle state要素の考え方を導入する。その際、クラック先端では変位の不連続性は発生しないことを考慮し、クラック先端に隣接するエンリッチノードの自由度  $a^i$  に対して、以下の境界条件を与える。

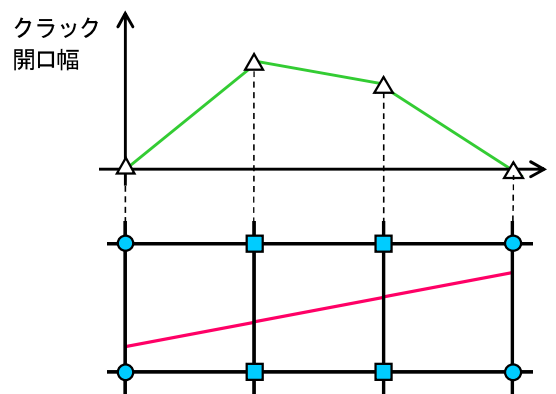
$$a^i = 0 \quad (1)$$

一方で、ある要素に独立したクラックが新たに発生する場合、式(1)による境界条件によりクラックの開口を表現できないという問題が生じる(図-10(a))。そこで本検討では、独立した新たなクラックを発生させる場合、隣接している要素にもクラックを発生させることとした(図-10(b))。

- △ 要素辺上におけるひび割れ開口幅
- エンリッチノードの自由度  $a^i$  を付加した節点 ( $a^i \neq 0$ )
- エンリッチノードの自由度  $a^i$  を付加した節点 ( $a^i = 0$ )
- エンリッチノードの自由度  $a^i$  を付加していない節点



(a) 一つの要素にのみ独立したクラックを発生させる場合



(b) 隣接している要素にもクラックを発生させた場合

図-10 独立した新たなクラックを発生させる場合

また要素の破壊判定は、解析モデルの都合上、エンリッチノードを有していない要素またはクラック先端を有している要素に対して行った。すなわち本解析では、エンリッチノードを有している要素のうち、クラック先端を有していない要素(要素Aとする)に関しては破壊判定を行っていない。そのため本解析モデルでは、要素Aで破壊基準が満足されたとしても、クラックは発生しない。しかしながら、要素Aにおいて引張応力度が増加して破壊基準が満たされた場合、その要素の近傍に位置する要素(要素Bとする)の引張応力度も同様に増加している。その結果、いずれ要素Bで破壊判定が行われてクラックが発生し、そのクラックの先端が要素Aに到達することで、要素Aでも破壊判定が行われるようになる。そのため、エンリッチノードを有していない要素またはクラック先端を有している要素にのみ破壊判定を実施するという解析上の制約は、解析で得られるひび割れ性状に大きな影響は与えないと考えられる。

### (3) 解析条件および解析モデル

本検討では、実験供試体であるSD5-Co, SD2-Co, SR5-Coを対象としたモデルを作成し、ひび割れ進展解析を行う。ここで各解析モデルを図-11に示す。解析モデルでは、コンクリート要素を線形ソリッド要素とし、ヤング率28000N/mm<sup>2</sup>、密度2.5 g/cm<sup>3</sup>、ポアソン比0.2とした。また、粘着力がゼロとなるクラックの開口変位は0.03mmとし、引張強度を2.5 N/mm<sup>2</sup>と3.0 N/mm<sup>2</sup>とする二

種類のケースに対し解析を行った。その際、実際の挙動では、目視できるひび割れが生じるまでにマイクロクラックや塑性変形などのエネルギー吸収が生じていると考えられる。一方、本解析ではコンクリート要素を線形弾性体と仮定しており、エネルギー吸収はクラック発生後の粘着力の作用により発生する。そのため、本解析では粘着力がゼロとなるひび割れ開口変位を閾値と考え、クラック面の鉛直方向および接線方向の不連続変位が閾値を超えたクラックを、解析結果のひび割れ図に示すこととした。

なお、本項ではヒンジ部コンクリートに作用する圧縮軸力と縦方向のひび割れの関係に焦点を当てた検討を行う。そこで本検討では、鉄筋はモデル化せず、柱天端の荷重軸力を変化させてヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力を増大させる。具体的には、実験で得られた正方向荷重時と負方向荷重時のヒンジ部コンクリートへの作用軸力(図-9)の平均値を参考とし、変位制御による片押し荷重時の回転角に合わせて柱天端の荷重軸力を変化させる(図-12)。以上の方法で、実験で確認された縦方向のひび割れの発生個所および発生タイミングが再現可能か検証する。

また本解析では、3.で示した実験結果を踏まえ、実験供試体において帯鉄筋および軸方向鉄筋に囲まれたコンクリートにはひび割れは発生しないと考える。その部分に該当するコンクリート要素では破壊判定を行わないこととした(図-11)。さらに、本実験供試体では、ヒンジ部コンクリートでは縦方向のひび割れの他に、図-13のように柱高さ0mmにおいて水平ひび割れが進展する様子が確認されている。しかし、X-FEMを用いた本解析モデルでは、要素を構成する辺上のひび割れ進展を表現できないため、図-13のような柱高さ0mmにおけるひび割れ進展を再現できない。そこで本検討では、柱高さ0mmの節点を有するコンクリート要素に発生するひび割れの発生位置および進展方向を図-14に示すように固定することとした。

### (4) 解析結果

解析により得られたひび割れ進展図を図-15に示す。図-15を見ると、実験結果同様、ヒンジ部コンクリートの隅角部から縦方向のひび割れが発生している。また、SD5-Coに関しては、実験で最初に縦方向のひび割れが発生した回転角が、解析でコンクリートの引張強度を2.5N/mm<sup>2</sup>とした場合と同程度であり、SR5-CoおよびSD2-Coに関しては、実験で最初に縦方向のひび割れが発生した回転角が、解析でコンクリートの引張強度を2.5 N/mm<sup>2</sup>とした場合と3.0 N/mm<sup>2</sup>とした場合の解析結果の間に収まっている(表-1)。そのため、縦方向のひび割れの発生タイミングに関しても妥当な値が得られているとい

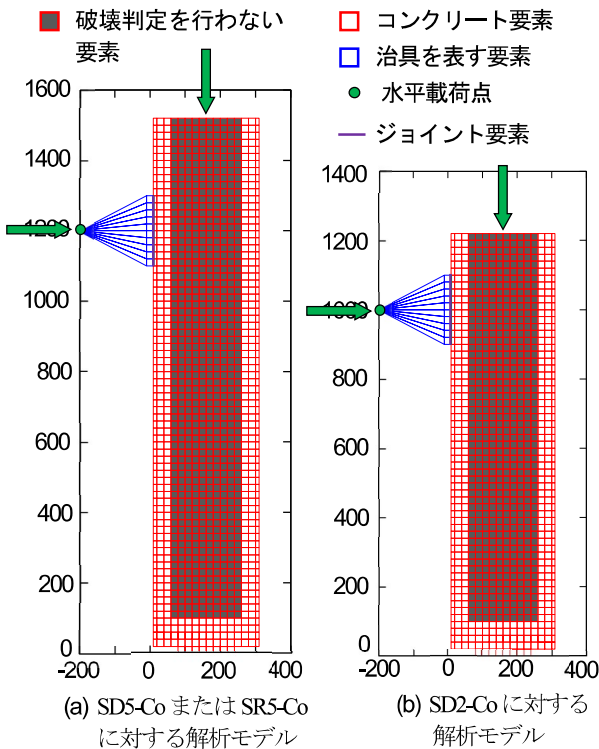
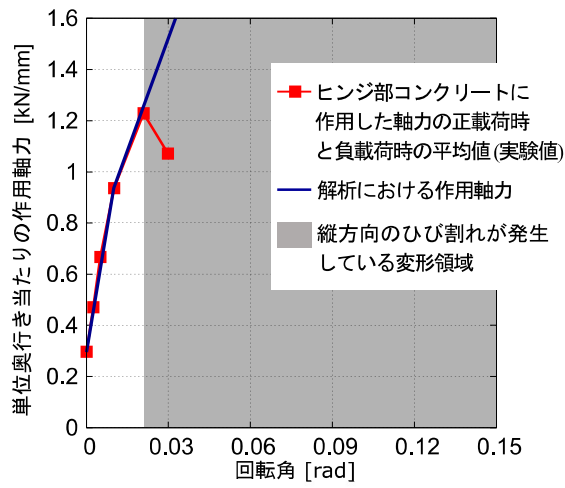
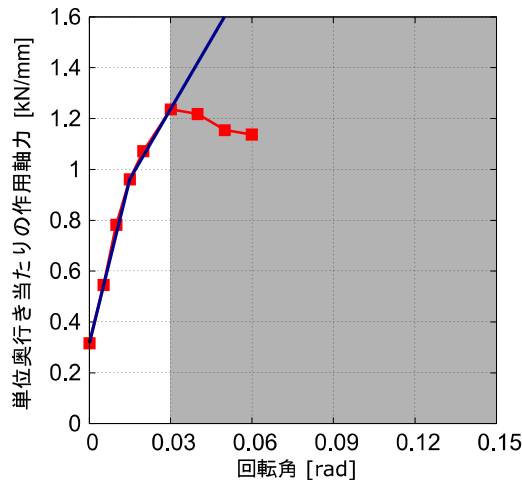


図-11 解析モデル

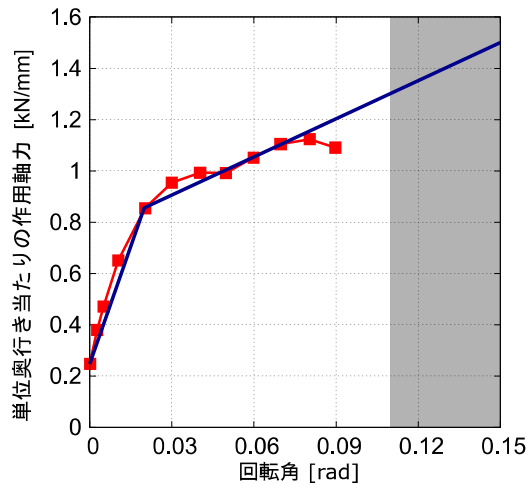




(a) SD5-Co



(b) SD2-Co



(c) SR5-Co

図-12 解析における作用軸力-回転角関係



図-13 実験で確認された柱高さ 0mm における水平ひび割れ

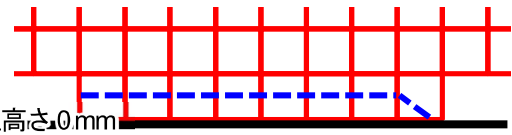


図-14 柱高さ 0mm の要素に発生させる水平ひび割れ(青線)

表-1 解析により得られた縦方向のひび割れ発生時の回転角

	引張強度 [N/mm <sup>2</sup> ]	縦方向のひび割れ発生時の回転角	
		解析結果 [rad]	実験結果 [rad]
SD5-Co	2.5	0.0219	0.02
	3.0	0.0313	
SD2-Co	2.5	0.0322	0.04
	3.0	0.0469	
SR5-Co	2.5	0.0923	0.11
	3.0	0.145	

表-2 ひび割れ発生時の主応力および主応力方向

	最小主応力 (主応力方向)	最大主応力 (主応力方向)
SD5-Co	-21.4 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.257, 0.966)	2.50 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.966, -0.257)
SD2-Co	-21.0 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.258, 0.966)	2.50 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.966, -0.258)
SR5-Co	-20.6 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.258, 0.966)	2.50 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.966, -0.258)

える。

以上のように、交差鉄筋をモデル化せずとも、回転角に合わせて作用軸力を増大させることで、ヒンジ部コンクリートに発生する縦方向のひび割れ発生位置、およびその発生タイミングが再現可能であった。

また、引張強度を2.5 N/mm<sup>2</sup>とした場合を例に、縦方向のひび割れが発生した要素(図-15において黄色で強調している要素)におけるひび割れ発生時の最大主応力、最小主応力およびそれぞれの応力方向を表-2に示す。表より、ヒンジ部コンクリートに発生した縦方向のひび割れは、圧縮軸力が作用したことによる割裂ひび割れであると判断できる。この結果から、現在我が国で広く採用されているヒンジ部コンクリート幅が広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れは、鉄筋とコンクリートの付着性状に起因するものではなく、ヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力の増大による割裂ひび割れである可能性が示された。

一方で、ひび割れ発生角度に関しては、実験で確認された各供試体間での違いが再現されていない。これは、微小変形理論による解析を行ったため、ヒンジ部コンクリートにかかる圧縮軸力の作用方向が、回転角の増加に伴って変化しなかったことが要因であると考えられる。

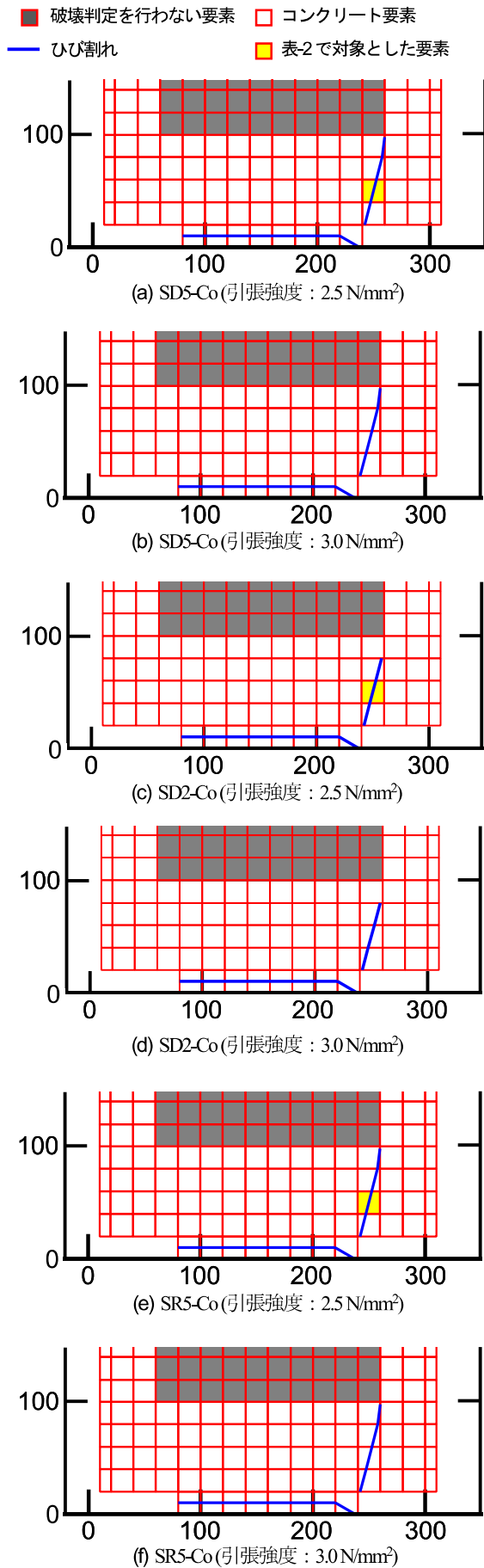


図-15 解析により得られたひび割れ図 [Unit: mm]

## 5. ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジ部のひび割れ性状に与える影響

### (1) 解析条件および解析モデル

本検討で用いる解析モデルを図-16および図-17に示す。本章では、ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジ部のひび割れ性状に与える影響について検討するため、解析モデルにおいて2種類のヒンジ部コンクリート幅(160mmおよび40mm)を採用した。その際、柱高さおよび載荷高さに関しては実験供試体SD5-Coと同様とした。コンクリート要素に関しては、引張強度は2.5N/mm<sup>2</sup>とし、その他の特性は、4.での検討と同様のものを用いた。

また、4.での検討では交差鉄筋をモデル化せず、柱天端の載荷軸力を変化させてヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力を増大させた。それに対し、本検討では交差鉄筋をモデル化し、実験でSD5-CoおよびSD2-Coに作用させた一定軸力応力を柱天端に作用させる。その際、交差鉄筋はvon Misesの降伏条件ならびにPrandtl-Reussの塑性流れ則に従う完全弾塑性のソリッド要素としてモデル化し、ヤング率は200000 N/mm<sup>2</sup>、降伏強度は345N/mm<sup>2</sup>、ポアソン比は0.3とした。また、軸方向鉄筋および帯鉄筋では軸引張変形が卓越すると判断し、トラス要素でモデル化した。なお、配筋および鉄筋径はSD5-Coと同様である。

また、交差鉄筋とコンクリート要素の付着は考慮せず、交差鉄筋の下端(柱高さ-200mm)に位置する節点を完全固定、上端(柱高さ+200mm)に位置する節点をコンクリート要素と共有させた。そして、筆者らが過去の研究<sup>7)</sup>で作成したファイバー要素を用いた解析モデルでの条件を参考に、交差鉄筋とコンクリートの変位が水平方向にずれないように、柱高さ0mmに位置し、かつヒンジ部の中心に位置する交差鉄筋の節点に対し、水平変位を拘束する条件を与えた。

### (2) 解析結果

#### a) ひび割れ性状

解析により得られたひび割れ図を図-18に示す。図-18より、ヒンジ部コンクリート幅が160mmの場合、3.での実験結果および4.での解析結果同様、ヒンジ部コンクリートの隅角部から縦方向のひび割れが発生している。ここで、縦方向のひび割れが発生した要素(図-18において黄色で強調している要素)におけるひび割れ発生時の最大主応力、最小主応力およびそれぞれの応力方向を表-3に示す。表より、ヒンジ部コンクリートに発生した縦方向のひび割れは、4.での解析結果同様、圧縮軸力が作用したことによる割裂ひび割れであると判断できる。以上の結果から、載荷軸力を一定として交差鉄筋をモデル化した場合でも、ヒンジ部コンクリートに発生する縦方向の圧縮割裂ひび割れが再現できることがわかった。

- コンクリート要素   □ 交差鉄筋を表す要素
- 治具を表す要素   ● 水平載荷点   — ジョイント要素
- 軸方向鉄筋および帯鉄筋を表す要素

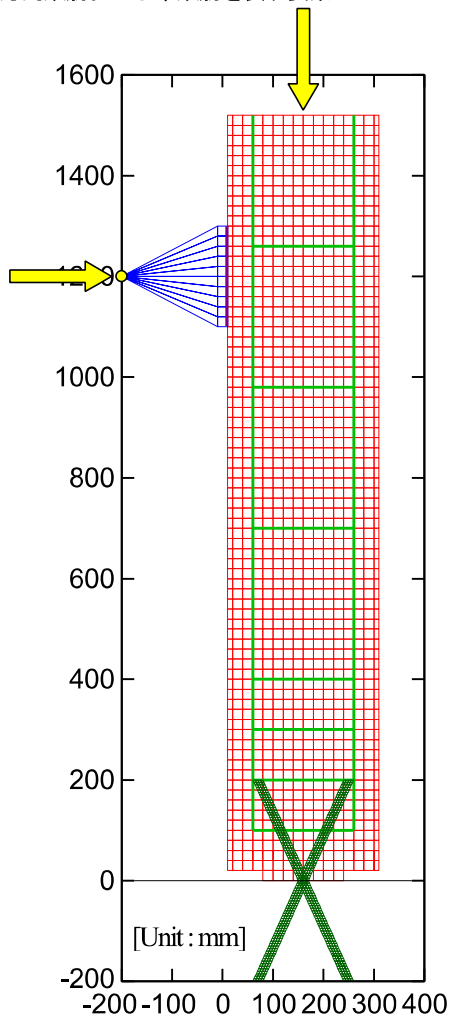


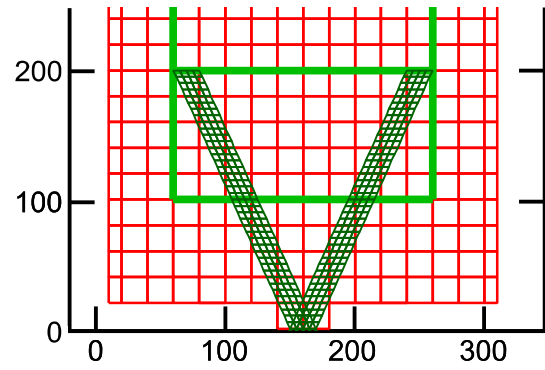
図-16 解析モデルの全体図(ヒンジ部コンクリート幅: 160mm)

しかし、初めて縦方向のひび割れが発生したときの回転角を見ると(表-3)、ヒンジ部コンクリート幅が160mmの場合において、3.での実験結果および4.での解析結果と比較して、縦方向のひび割れが早期に発生していることがわかる。よって、本解析モデルを用いた解析では、縦方向のひび割れ時の回転角を過少に算出する傾向があるといえる。なお、この要因については5.(2)b)にて検討する。

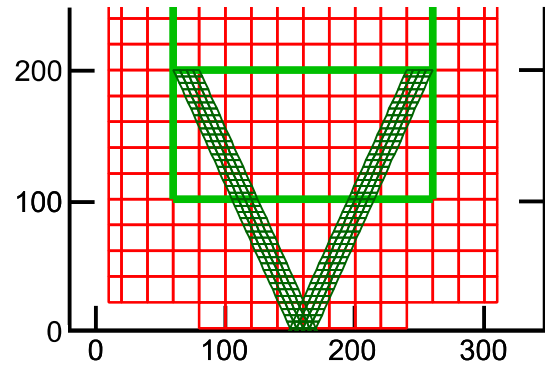
また、ヒンジ部コンクリート幅が40mmの場合、3.での実験において、回転角がSD2-Coで縦方向のひび割れが発生した0.04radに達しても、縦方向のひび割れは発生しなかった。そのため、ヒンジ部コンクリート幅が狭い場合、ヒンジ部に作用する軸圧縮力による縦方向の割裂ひび割れは発生しない可能性が示された。

しかしながら、過去の研究においてParsons and Stang<sup>4)</sup>や

- コンクリート要素   □ 交差鉄筋を表す要素
- 軸方向鉄筋および帯鉄筋を表す要素



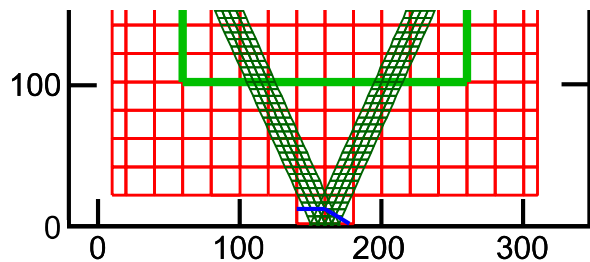
(a) ヒンジ部コンクリート幅: 40mm



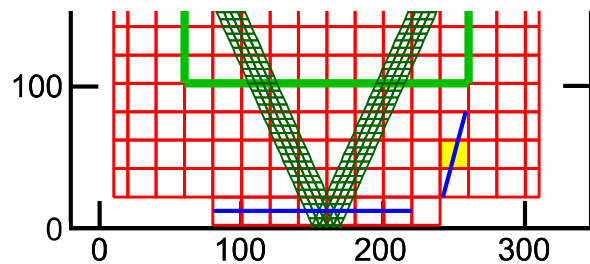
(b) ヒンジ部コンクリート幅: 160mm

図-17 解析モデルにおけるヒンジ部[Unit: mm]

- コンクリート要素   □ 交差鉄筋を表す要素
- ひび割れ   ■ 表-3で対象とした要素
- 軸方向鉄筋および帯鉄筋を表す要素



(a) ヒンジ部コンクリート幅: 40mm



(b) ヒンジ部コンクリート幅: 160mm

図-18 交差鉄筋をモデル化した解析により得られたひび割れ図[Unit: mm]

Moreell<sup>9)</sup>が指摘したように、ヒンジ部コンクリートの幅が狭い場合、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着によって、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生する可能性がある。本解析では、交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着はモデル化していないため、ヒンジ部に発生する付着ひび割れは再現できないが、ヒンジ部コンクリート幅が交差鉄筋とヒンジ部コンクリートの付着によるひび割れに与える影響についても、検討の余地が残っているといえる。

b) ヒンジ部コンクリートへの作用軸力

図-19に解析により算出されたヒンジ部コンクリートへの作用軸力(圧縮：正)を示す。図より、いずれのケースにおいても、回転角の増加に伴ってヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力が增大していることがわかる。本解析では載荷軸力は一定であるため、これは回転角の増加に伴って、交差鉄筋が発揮する引張力が増加しているためである。

また、ヒンジ部コンクリートの幅が広いほど、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力が大きいことがわかる。ここで、ヒンジ部コンクリート幅を160mmとした場合における縦方向のひび割れ発生時の柱基部付近の交差鉄筋の最大主応力分布を図-20に示す。なお図中では、交差鉄筋のうち、より引張変形を受ける鉄筋の結果を示

している。図-20より、ヒンジ部コンクリートの幅が広いほど交差鉄筋が発揮する引張力が大きいことがわかる。これは、ヒンジ部コンクリートの幅が広いほど、回転角の増大に伴い圧縮側に移動するヒンジ部の回転中心(ヒンジ部断面の中立軸)と交差鉄筋位置が離れるため、交差鉄筋の引張変形量が増加するためである。

以上の結果から、ヒンジ部コンクリート幅を変化させた本解析により、ヒンジ部コンクリート幅の違いが交差鉄筋の変形挙動に影響を与え、その結果、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力が変化したこと、縦方向のひび割れ発生タイミングに違いが生じることがわかった。

また、ヒンジ部コンクリート幅が160mmとして得られたヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力を見ると、実験結果より過大に算出されていることがわかる。その

表-3 交差鉄筋をモデル化した解析により得られた縦方向のひび割れ発生時の回転角および主応力・主応力方向

ヒンジ部コンクリート幅	縦方向のひび割れ発生時の回転角	最小主応力 (主応力方向)	最大主応力 (主応力方向)
40 [mm]	—	—	—
160 [mm]	0.0107 [rad]	-21.4 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.258, 0.966)	2.50 [N/mm <sup>2</sup> ] (0.966, -0.258)

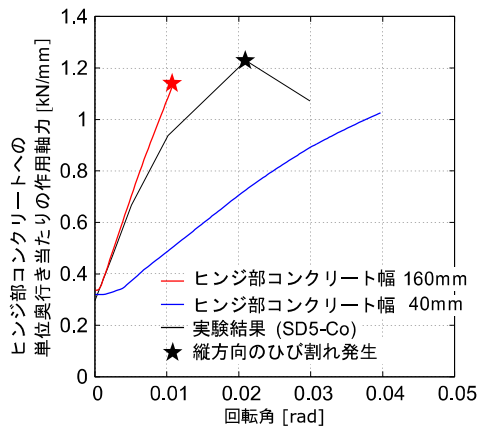
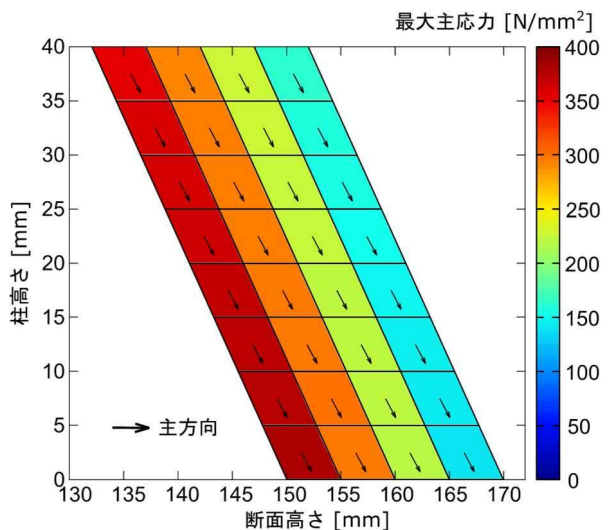
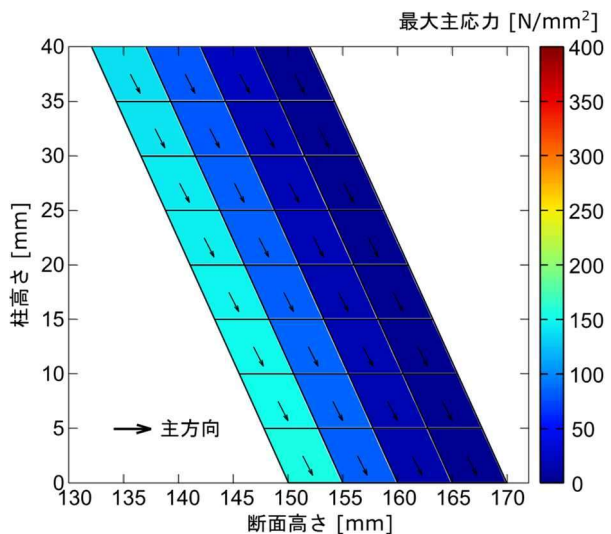


図-19 交差鉄筋をモデル化した解析により得られたヒンジ部コンクリートへの作用軸力(圧縮：正)



(a) ヒンジ部コンクリート幅：160mm



(b) ヒンジ部コンクリート幅：40mm

図-20 交差鉄筋の最大主応力分布

ため、5.(2)a)で述べたひび割れ発生時の回転角の過少算出は、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力を過大に算出していることが原因であると考えられる。これは、本解析においてコンクリート要素を線形弾性体と仮定していることなどが原因として挙げられる。また、解析で得られた抵抗モーメント-回転角関係を見ると(図-21)、SD5-Coにおける実験値と比較して回転初期の剛性は概ね一致しているものの、回転角0.01rad付近の変形領域では、回転剛性が実験値よりも過大に算出されていることがわかる。そのため、より詳細にヒンジ部の回転挙動および応力状態を検討するためには、解析モデルの更なる精度向上が必要であるといえる。

### (3) ヒンジ部における縦方向のひび割れに対する適切な照査について

道路橋支承便覧では、メナーゼヒンジは大きな回転角が生じる構造には使用できないという前提条件の下で、作用回転角が0.05rad以下となる範囲での設計法が示されている。そして、メナーゼヒンジ部に軸圧縮力が作用する際、交差鉄筋とコンクリートの付着によりヒンジ部に縦方向のひび割れが発生すると記載されている。

そのような中、これまでの検討の結果、ヒンジ部コンクリートの幅が広い場合、ヒンジ部に回転変形が発生すると、交差鉄筋が発揮する引張力の反力により、ヒンジ部コンクリートから圧縮割裂ひび割れが発生する可能性が示された。そのため、道路橋支承便覧に記載されているひび割れ発生メカニズムは、軸圧縮力に対してのみの照査を行う際は適用可能であるものの、ヒンジ部の回転を許容する際は、従来の照査に加えて、ヒンジ部コンク

リート幅およびヒンジ部への作用回転角に応じて、交差鉄筋の引張反力を加えたヒンジ部コンクリートへの作用圧縮力についての照査を行うべきであるといえる。

## 6. まとめ

本研究では、先行研究(文献7~9)での実験結果を参考に、現在我が国で広く採用されているヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れの発生メカニズムを検討した。そしてその検討結果を参考に、拡張有限要素法(X-FEM)を用いたひび割れ進展解析を実施した。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幅の広いメナーゼヒンジを有する本実験供試体で確認された縦方向のひび割れは、ヒンジ部コンクリートの隅角部付近から発生しており、鉄筋に沿って進展していなかった。
- ヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジを有する本実験供試体で確認された縦方向のひび割れは、交差鉄筋に丸鋼を用いた供試体においても縦方向のひび割れが発生することがわかった。
- 上記の結果から、本実験で確認された、ヒンジ部コンクリート幅が広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れは、道路橋支承便覧に記載されているひび割れ発生メカニズムと異なるメカニズムで発生したと考えられる。
- 実験結果から、ヒンジ部コンクリートに作用する軸力の単位奥行き当たりの値が大きい供試体ほど、早期に縦方向のひび割れが発生していることがわかった。そのため、本実験供試体のメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れが、ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力により発生している可能性が示唆された。
- 拡張有限要素法(X-FEM)を用いて実験供試体のひび割れ進展解析を行った。その結果、交差鉄筋をモデル化せずとも、回転角に合わせて作用軸力を増大させることで、ヒンジ部コンクリートに発生する縦方向のひび割れ発生位置、およびその発生タイミングを再現することができた。よって、ヒンジ部コンクリート幅が広いメナーゼヒンジにおける縦方向のひび割れが、ヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力の増大による割裂ひび割れである可能性が解析的検討からも示された。
- ヒンジ部コンクリート幅がメナーゼヒンジ部のひび割れ性状に与える影響について解析的に検討した結果、ヒンジ部コンクリートの幅が広いほど、ヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力の増大に起因する割裂ひび割れが早期に発生することを確認し

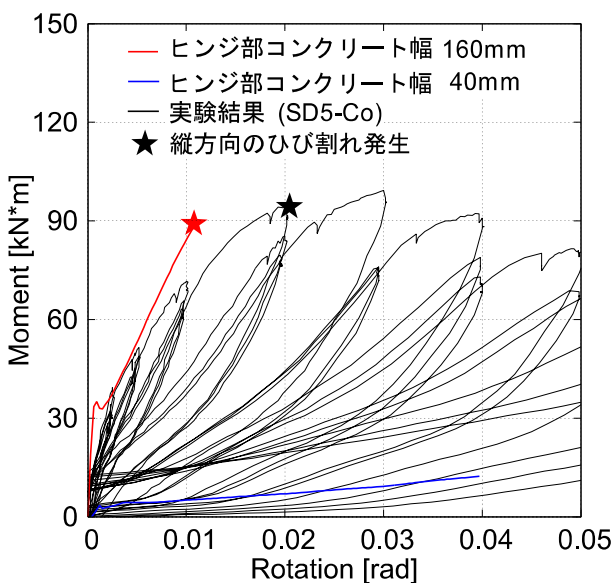


図-21 交差鉄筋をモデル化した解析により得られたヒンジ部の抵抗モーメント-回転角関係

た。これは、ヒンジ部コンクリート幅の違いが交差鉄筋の変形挙動に影響を与え、その結果ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力が変化することが要因であると考えられる。

- 道路橋支承便覧に記載されているひび割れ発生メカニズムは、軸圧縮力に対してのみの照査を行う際は適用可能であるものの、ヒンジ部の回転を許容する際は、従来の照査に加えて、ヒンジ部コンクリート幅およびヒンジ部への作用回転角に応じて、交差鉄筋の引張反力を加えたヒンジ部コンクリートへの作用圧縮力についての照査を行うべきであるといえる。

**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および科学研究費補助金特別研究員奨励費18J14437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 routes en Béton armé, *Annales des Ponts et Chaussées*, 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. and Marx, S.: Engineering History and Heritage, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, Vol. 168, Issue EH2, pp. 64-74, 2015.
- 4) Parsons, D. E. and Stang, A. H.: Test of Mesnager hinges, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 31, Issue 1, pp. 304-325, 1935.
- 5) Moreell, B.: Articulations for concrete structures - The Mesnager hinge, *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 32, Issue 3, pp. 368-381, 1935.
- 6) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2018.12
- 7) Ahmed, R. A., 高橋良和, 柘木正喜：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.
- 8) 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.
- 9) 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, 土木学会論文集 A1, Vol.75, No.4, pp.I\_391-I\_407, 2019.
- 10) Belytschko, T. and Black, T.: Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 45, No. 5, pp. 601-620, 1999.
- 11) Moës, N., Dolbow, J. and Belytschko, T.: A finite element method for crack growth without remeshing, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 46, No. 5, pp. 131-150, 1999.
- 12) Zi, G. and Belytschko, T.: New crack-tip elements for XFEM and applications to cohesive cracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 57, pp. 2221-2240, 2003.
- 13) 池田貴昭, 後藤浩之, 澤田純男：地震時盛土の引張破壊を考慮した拡張有限要素法によるクラック進展解析, 土木学会論文集 A2 (応用力学), Vol. 72, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 19), pp. I\_227-I\_235, 2016.
- 14) Zhao, J., Bessa, M. A., Oswald, J., Liu, Z. and Belytschko, T.: A method for modeling the transition of weak discontinuities to strong discontinuities: from interface to cracks, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol. 105, pp. 834-854, 2015.
- 15) Dugdale, D. S.: Yielding of steel sheets containing slits, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 8, pp. 100-104, 1960.
- 16) Barenblatt, G. I.: The mathematical theory of equilibrium of cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 7, pp. 55-129, 1962.
- 17) 和田一範, 後藤浩之：拡張有限要素法(X-FEM)を用いた自発的な断層破壊の数値解析手法の開発, 応用力学論文集, Vol. 13, pp. 667-674, 2010.
- 18) Goto, H. and Bielak, J.: Galerkin boundary integral equation method for spontaneous rupture propagation problems: SH-case, *Geophys. J. Int.*, Vol. 172, pp. 1083-1103, 2008.

(2019.11.12 受付, 2020.2.20 修正, 2020.2.21 受理)

## MECHANISM OF VERTICAL CRACK GENERATION ON MESNAGER HINGE

Keita UEMURA, Yoshikazu TAKAHASHI and Hiroyuki GOTO

In Mesnager hinge, cracks are known to generate on concrete in the hinge throat and propagate above the hinge throat (hereinafter, the crack is called “the vertical crack”). Japanese seismic code assumes that transmission force due to bond between concrete and crossing reinforcing bars causes the cracks. However, the factual mechanism of the crack generation has not been investigated. Recently, cyclic loading tests for rocker piers with Mesnager hinge were conducted, and this study investigated the results of these cyclic loading test. From the results, the vertical cracks were observed in all the specimens including one in which plain rebars used as crossing reinforcing bars, and the cracks did not propagate along crossing reinforcing bars. Thus, the assumption of vertical crack generation is not correct in Japanese seismic code. The crack generation was numerically validated by using X-FEM. The results showed that the vertical cracks were generated by compression load on concrete in the hinge throat.