

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¹・高橋 良和²・後藤 浩之³

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

³ 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。そしてその検討結果を踏まえ、拡張版有限要素法(X-FEM)を用いたひび割れ進展解析を実施した。その結果、ヒンジ部コンクリート幅の広いメナーゼヒンジでは、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²³⁾。そのような中、Parson and Stang⁴⁾やMorell⁵⁾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。この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よって発生するというメカニズムは、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²³⁾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な知見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⁶⁾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、現在我が国で一般的に採用されているメナーゼヒンジでは、Parson and StangやMorell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ことが知られている。そのため、ヒンジ部コンクリート幅が広いメナーゼヒンジとParson and StangやMorell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。そのため、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、現在我が国で供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. 正負交番載荷実験概要

(1) 実験供試体

本研究では、現在我が国で一般的となっ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、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。そのため、Parson and StangやMoreellが検討対象としたメナーゼヒンジのヒンジ部コンクリート幅が50.8mm(2.0 in)であり、交差鉄筋の最小かぶり厚さが12.7mm(0.5 in)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($\phi 22$ SD345)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30.1MPa、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) 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、

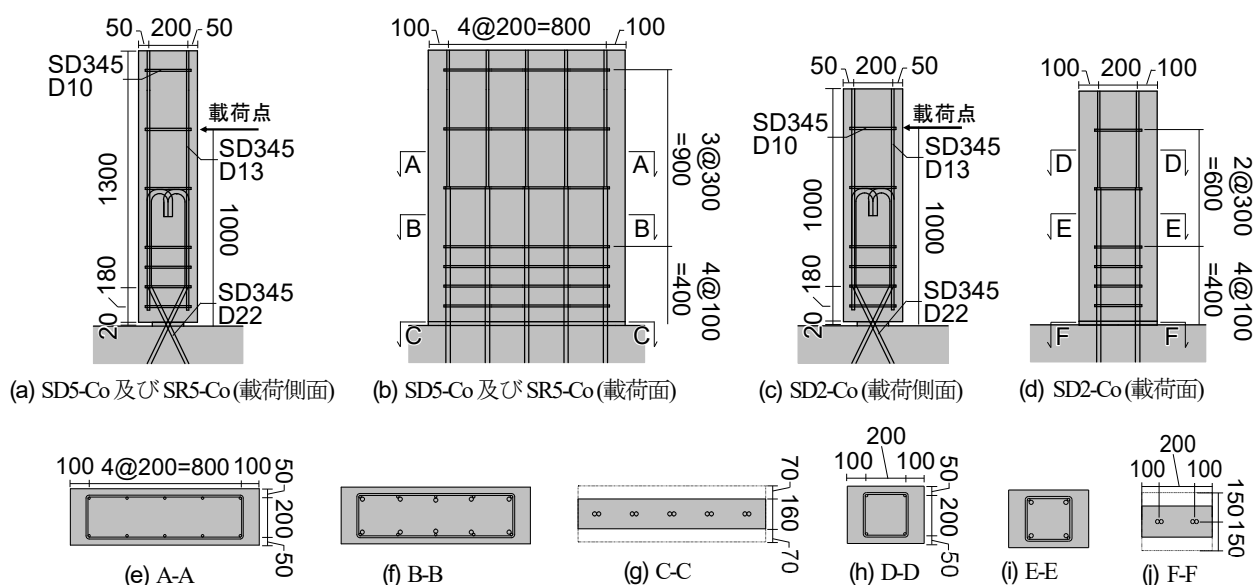


図-1 供試体の配筋図

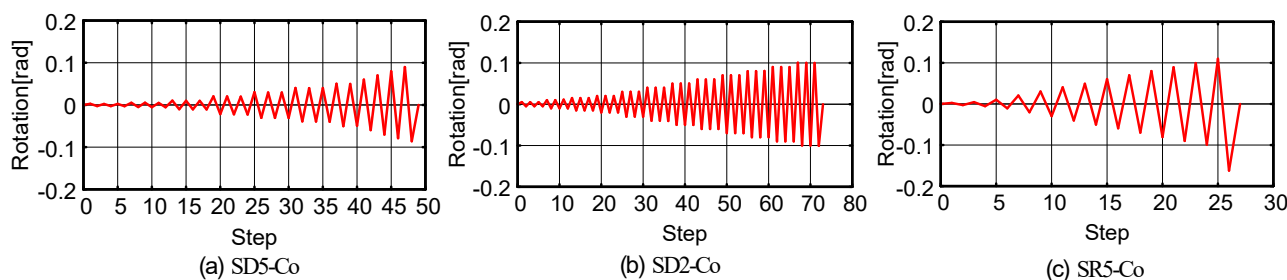


図-2 荷重サイクル

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1.2MPa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荷重位置における復元力及び軸力を測定した。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。

3. 実験結果及び考察

(1) ひび割れ性状

いずれの供試体も、荷重当初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が、

SD5-Coでは回転角0.02rad, SD2-Coでは回転角0.04rad, SR5-Coでは回転角0.11radになった際に、ヒンジ部に縦方向のひび割れが発生した。図-3にヒンジ部コンクリートから発生した縦方向のひび割れの様子とひび割れ発生時の回転角を示す。なお図-3には、供試体に初めて発生した縦方向のひび割れと最大荷重振幅時の縦方向のひび割れの様子を併せて示している。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-3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ンクリートの付着によって発生したとは考えにくい。

以上から、道路橋支承便覧に記載されているメナーゼヒンジにおけるひび割れ発生メカニズムは、現在我が国

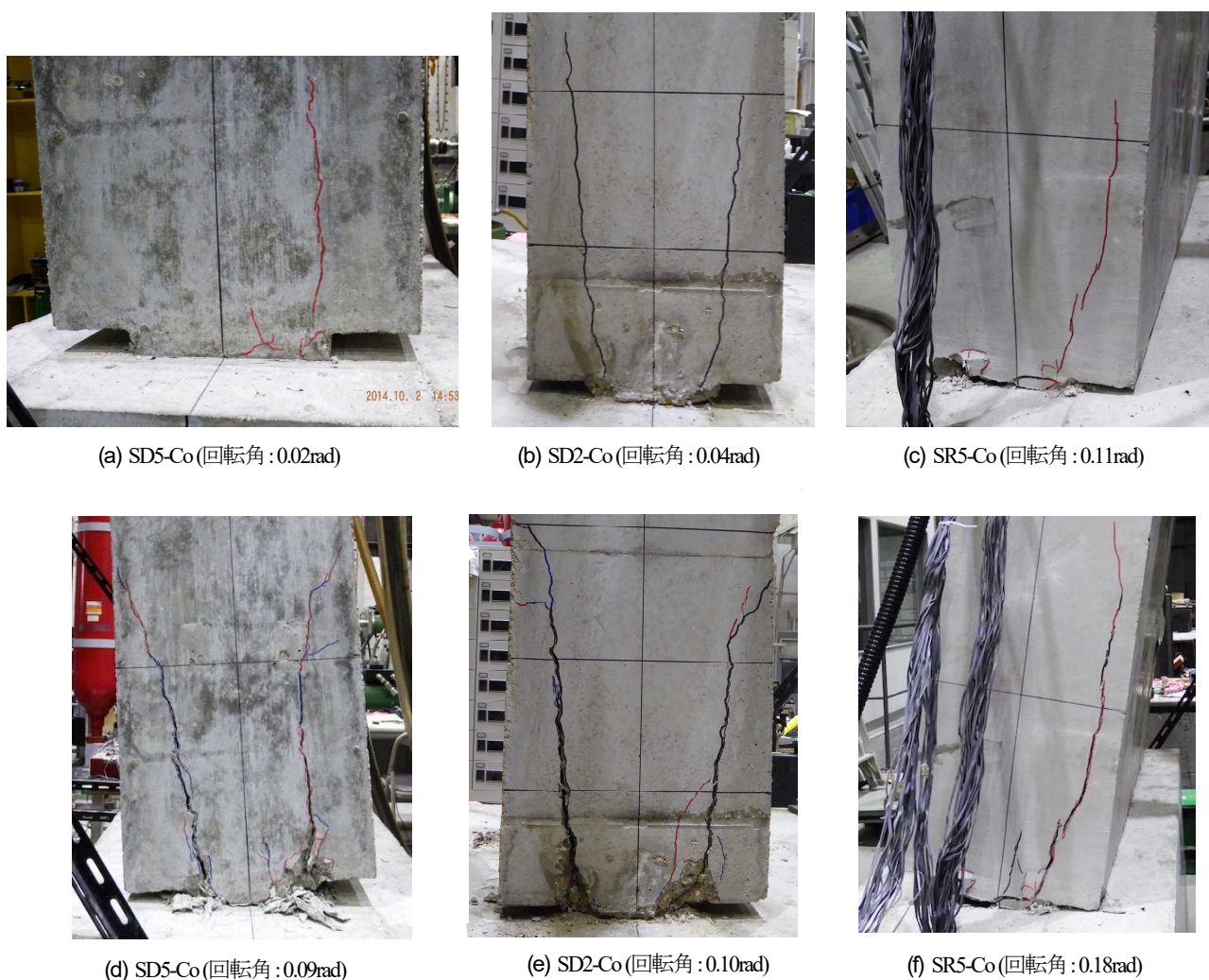


図-3 ヒンジ部コンクリートから発生した縦方向のひび割れとそのときのヒンジ部の回転角

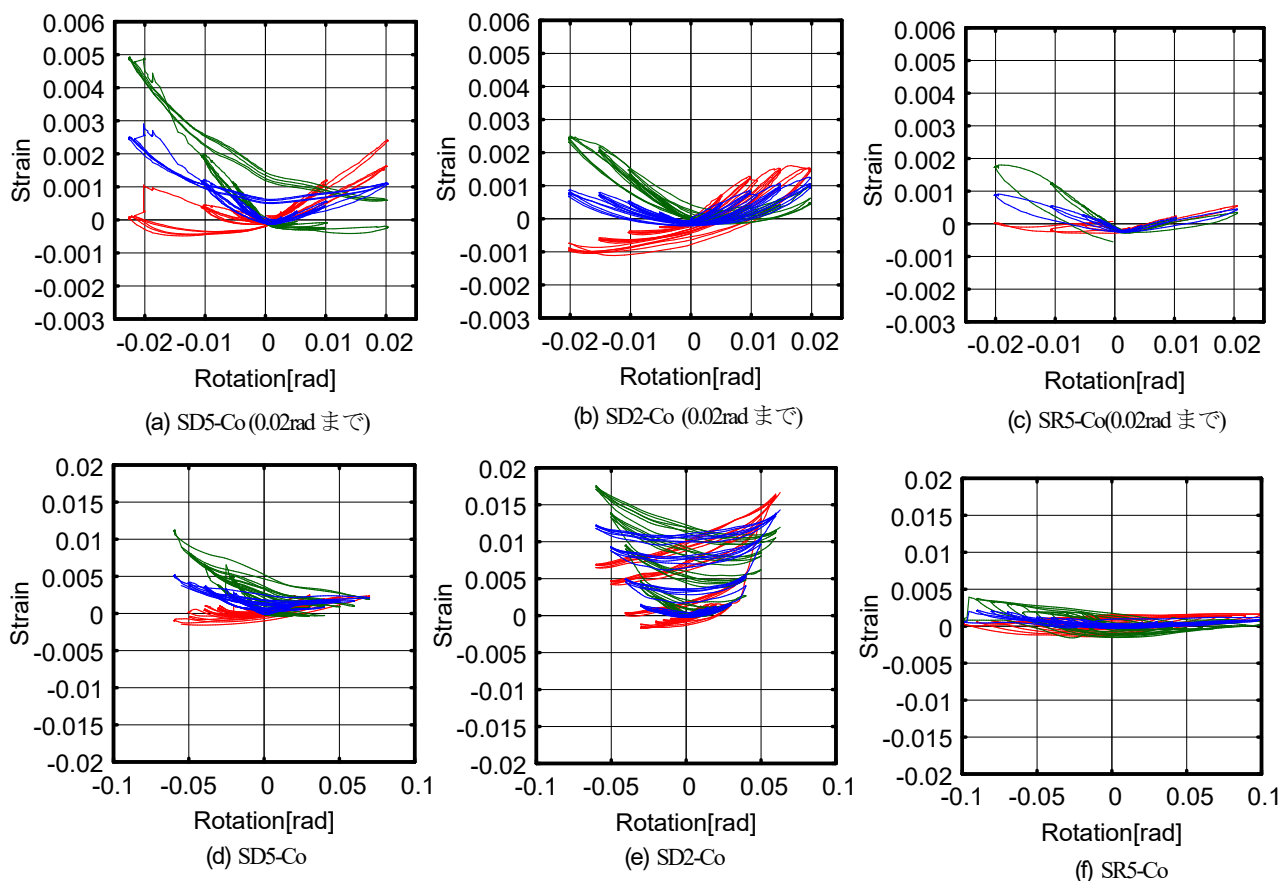


図4 交差鉄筋ひずみ-回転角関係(赤線・緑線：断面最外縁ひずみ，青線：軸ひずみ)

で一般的となっ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対しては適切でない可能性が考えられる。

(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。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、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⁹⁾。しかし、いずれの供試体においても、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)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。

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

4.(1),(2)での検討結果から、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。4.(2)で述べたように、本実験供試体では、道路橋支承便覧における想定とは違い、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た。そのため、回転角が増大すると交差鉄筋にはより大きな引張力が発生する。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-5)、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ことがわかる。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が、縦方向のひび割れ発生の要因で

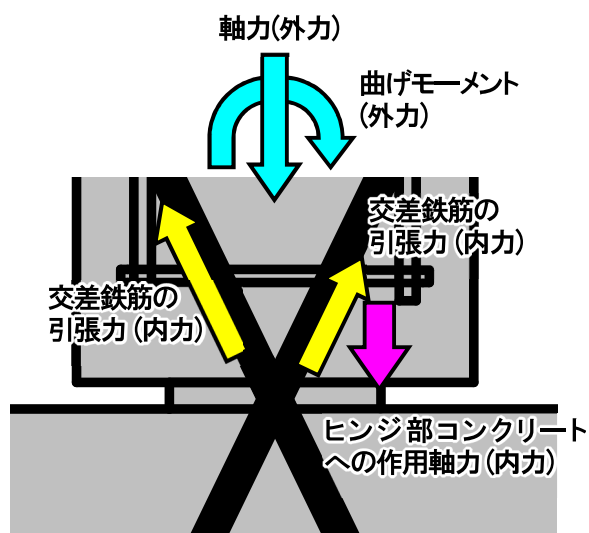


図-5 ヒンジ部断面における力の釣り合い

あると推測した。

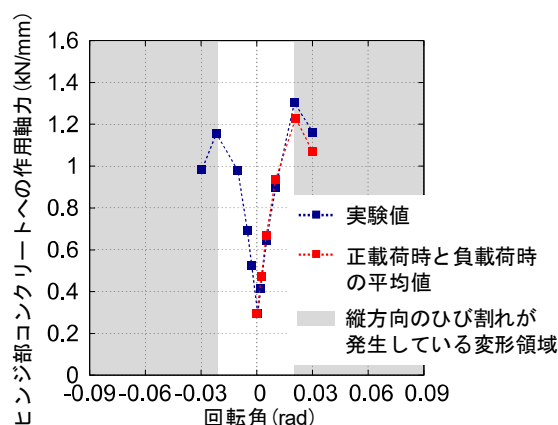
ここで、図-6に各载荷サイクルの最大回転角においてヒンジ部コンクリートの単位奥行きあたりに作用する軸力(圧縮：正)を示す。軸力はヒンジ部断面の力の釣り合いから、「载荷軸力+交差鉄筋が発揮した引張力」として算出している。なお、交差鉄筋が発揮した引張力は、交差鉄筋の応力-ひずみ関係を完全弾塑性バイリニアとし、降伏応力およびヤング率は引張試験の結果を参考に 386.9N/mm^2 、 199200N/mm^2 とした。図-6より、ヒンジ部コンクリートに作用する軸力の単位奥行き当たりの値が大きい供試体ほど早期に縦方向のひび割れが発生している。

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唆された。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。

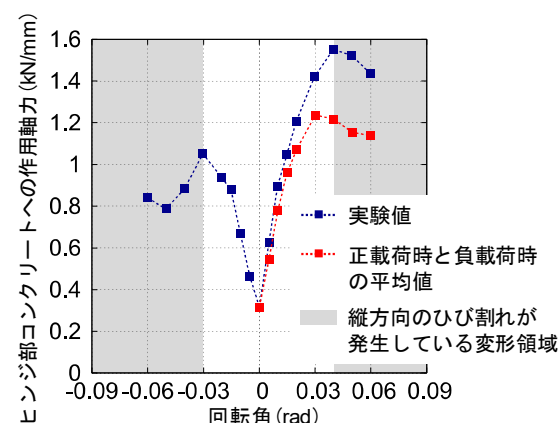
4. ヒンジ部コンクリートに作用する軸圧縮力と縦方向のひび割れの関係について

(1) 本検討の概要

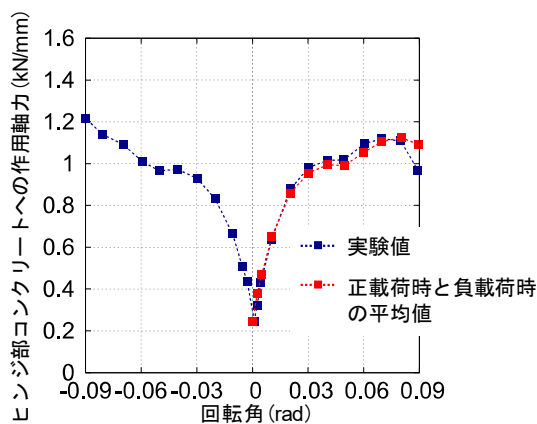
1.で述べたように、道路橋支承便覧では、ヒンジ部コンクリートに発生する縦方向のひび割れは鉄筋とコンクリートの付着により発生すると記載されている。しかし、実験供試体のような幅の広いヒンジ部コンクリートを有するメナーゼヒンジでは縦方向のひび割れは鉄筋に沿って生じておらず、交差鉄筋に丸鋼を用いた場合でもひび割れが発生することがわかった。そこで筆者らは、幅の広いヒンジ部コンクリートにおける縦方向のひび割れ発



(a) SD5-Co (縦方向のひび割れ発生: 0.02rad)



(b) SD2-Co (縦方向のひび割れ発生: 0.04rad)



(c) SR5-Co (縦方向のひび割れ発生: 0.11rad)

図-6 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)

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^{10,11)})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 function¹²⁾)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¹³⁾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¹⁴⁾。

(2) ひび割れの表現

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、準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、ひび割れが開閉する際にひび割れ面に働く表面力については、池田ら¹³⁾による方法に倣い、粘着力がひび割れ開口変位に応じて徐々に低下する cohesive crack model を用いる^{15),16)}。

また、和田・後藤¹⁷⁾はX-FEMを用いたひび割れの動的進展解析において、ひび割れ先端を有している要素のうち、ひび割れが位置している要素をMiddle state 要素¹⁸⁾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、ひび割れ先端では変位の不連続性は発生しないことを考慮し、ひび割れ先端に隣接するエンリッチノードの自由度 d 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新たなひび割れが発生する場合、式(1)による境界条件によりひび割れの開口を表現できないという問題が生じる(図-7(a))。そこで、独立した新たなひび割れを発生させる場合、隣接している要素にもひび割れを発生させる(図-7(b))。

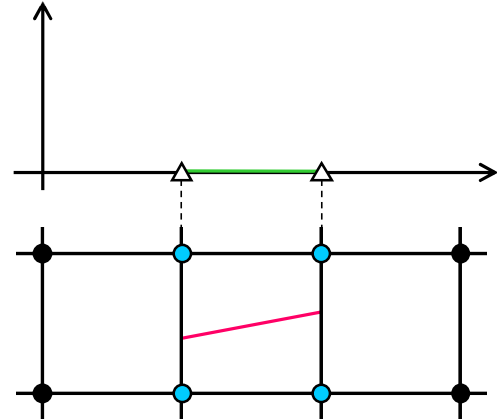
(3) 解析条件および解析モデル

本検討では、実験供試体であるSD5-Co, SD5-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-8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/mm²、密度2.5 g/cm³、ポアソン比0.2とした。また、粘着力がゼロとなるひび割れの開口変位は0.03mmとし、引張強度を2.5 N/mm²と3.0 N/mm²とする二種類のケースに対し解析を行った。

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、柱天端の载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る。具体的には、実験で得られた正方向載

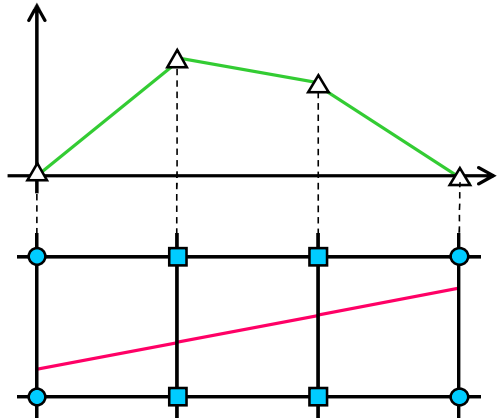
- △ 要素辺上におけるひび割れ開口幅
- エンリッチノードの自由度 d を付加した節点 ($d \neq 0$)
- エンリッチノードの自由度 d を付加した節点 ($d = 0$)
- エンリッチノードの自由度 d を付加していない節点

ひび割れ開口幅



(a) ひび割れ先端が辺上に存在しない要素にのみひび割れを発生させた場合

ひび割れ開口幅



(b) 隣接している要素にもひび割れを発生させた場合

図-7 独立した新たなひび割れを発生させる場合

荷時と負方向载荷時のヒンジ部コンクリートへの作用軸力(図-6)の平均値を参考とし、変位制御による片押し载荷時の回転角に合わせて柱天端の载荷軸力を変化させる(図-9)。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箇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、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、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-8)。さらに、本実験

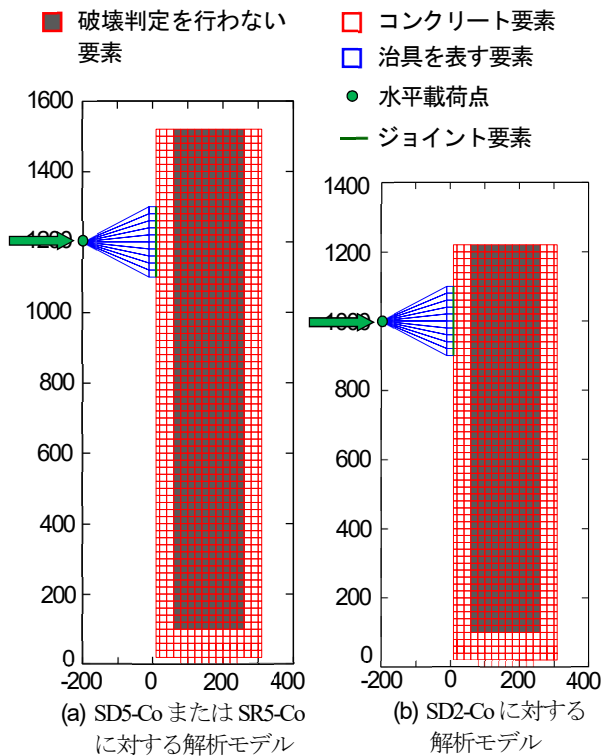


図-8 解析モデル

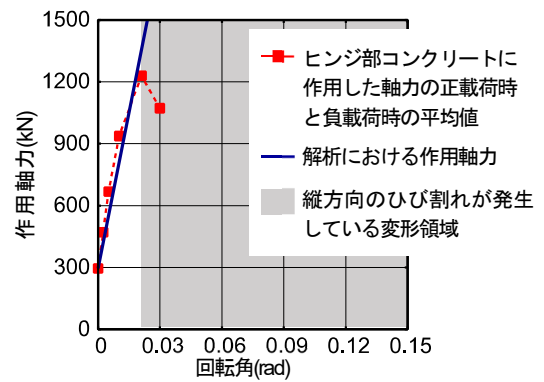
供試体では、ヒンジ部コンクリートでは縦方向のひび割れの他に、図-10のように柱高さ0mmにおいて水平ひび割れが進展する様子が確認されている。しかし、X-FEMを用いた本解析モデルでは、要素を構成する辺上のひび割れ進展を表現できないため、図-10のような柱高さ0mmにおけるひび割れ進展を再現できない。そこで本検討では、柱高さ0mmの節点を有するコンクリート要素に発生するひび割れの発生位置および進展方向を図-11に示すように固定することとした。

(4) 解析結果

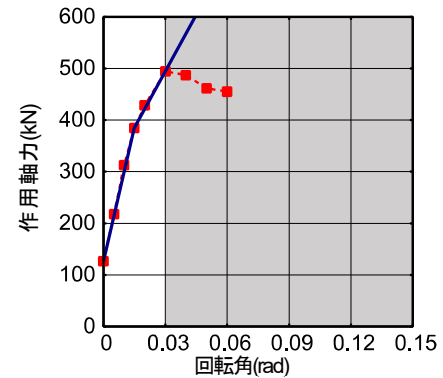
解析により得られたひび割れ進展図を図-12に示す。図-12を見ると、実験結果同様、ヒンジ部コンクリートの隅角部から縦方向のひび割れが発生している。また、実験で縦方向のひび割れが発生した回転角が、解析でコンクリートの引張強度を2.5MPaとした場合と3.0MPaとした場合の間の値となっており、縦方向のひび割れ発生タイミングに関しても妥当な値が得られている(表-1)。

ここで、引張強度を3.0MPaとした場合を例に、縦方向のひび割れが最初に発生した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、圧縮応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。

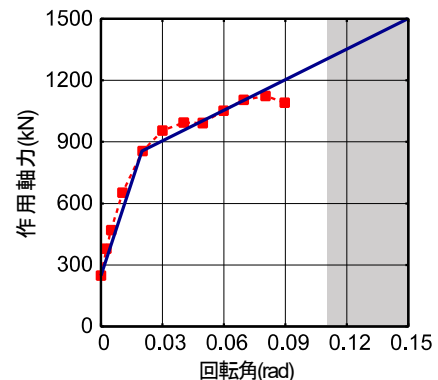
以上のように、交差鉄筋をモデル化せずとも、回転角



(a) SD5-Co



(b) SD2-Co



(c) SR5-Co

図-9 解析における作用軸力ー回転角関係



図-10 実験で確認された柱高さ0mmにおける水平ひび割れ

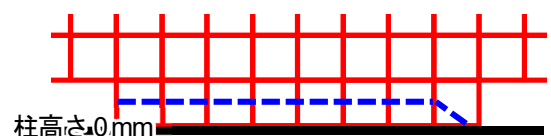


図-11 柱高さ0mmの要素に発生させる水平ひび割れ(青線)

■ 破壊判定を行わない要素 □ コンクリート要素
 〃 ひび割れ ■ 表-1,表-2で対象とした要素

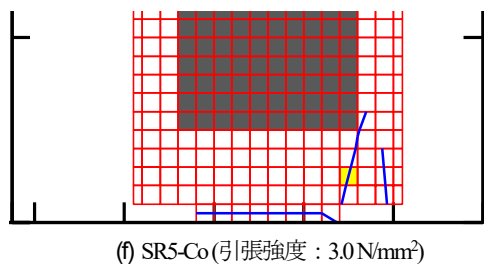
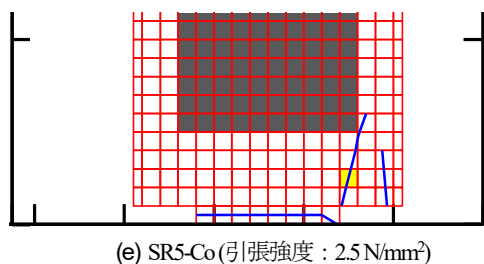
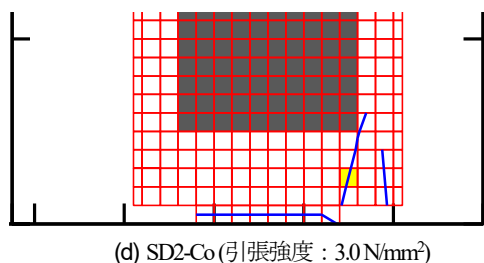
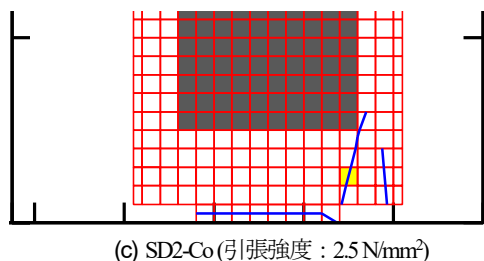
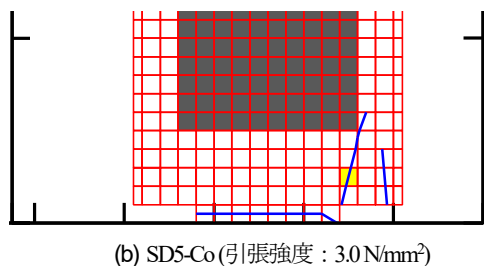
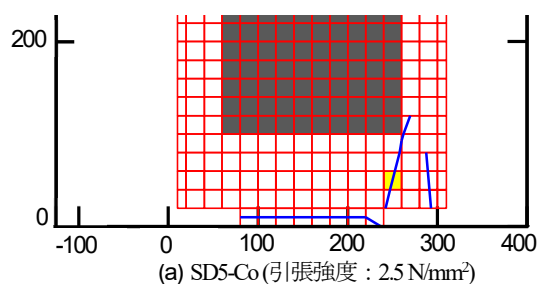


図-12 解析により得られたひび割れ進展図

表-1 解析により得られたひび割れ進展図

	引張強度	縦方向のひび割れ発生時の回転角	
		解析結果	実験結果
SD5-Co	2.5 [N/mm ²]	0.0182 [rad]	0.02 [rad]
	3.0 [N/mm ²]	0.0231 [rad]	
SD2-Co	2.5 [N/mm ²]	0.0297 [rad]	0.04 [rad]
	3.0 [N/mm ²]	0.0429 [rad]	
SR5-Co	2.5 [N/mm ²]	0.0775 [rad]	0.11 [rad]
	3.0 [N/mm ²]	0.136 [rad]	

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 ²] (0.257, 0.966)	2.50 [N/mm ²] (0.966, -0.257)
SD2-Co	-21.0 [N/mm ²] (0.258, 0.966)	2.50 [N/mm ²] (0.966, -0.258)
SR5-Co	-20.6 [N/mm ²] (0.258, 0.966)	2.50 [N/mm ²] (0.966, -0.258)

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。この結果から、現在我が国で一般的となっ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、交差鉄筋の引張力に起因するヒンジ部コンクリートへの圧縮軸力を作用軸力の増大に置き換えていることや、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応力の主方向が回転角の増加に伴って変化しなかったためであると考えられる。

5. 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、現在我が国で一般的となっ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、拡張版有限要素法(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、道路橋支承便覧に記載されている、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よって発生するというひび割れ発生メカニズムは、現在我が国で一般的となっ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対しては適切でない可能性が示された。
- 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。その結果、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。

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) 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, 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.
- 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, 第 38 回地震工学研究発表会講演論文集, No. 1292, 2018.
- 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), 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.

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.