

# 論文 鉄筋応力に応じた付着強度モデルの RC 造柱梁接合部の解析への適用性

早坂 香苗\*1・田嶋 和樹\*2・長沼 一洋\*3・佐藤 裕一\*4

**要旨:**繰り返し载荷を受ける RC 造柱梁接合部の損傷度やエネルギー吸収量を解析で精度良く予測するため、履歴性状に影響を及ぼすと考えられる付着性状に着目し、鉄筋の応力状態に応じて付着強度が変化するモデルを考案した。既往の実験結果を参考に、鉄筋が圧縮応力状態にある場合の付着強度を高くすることで、鉄筋の引抜き、押込み実験及び柱梁接合部の解析において実験結果の再現性が向上することを確認した。特に、鉄筋が圧縮降伏する時の付着強度を引張降伏時の6倍に設定したモデルが最も良好な結果を示した。

**キーワード:** 三次元 FEM 解析, スリップ型履歴性状, エネルギー吸収能, 鉄筋の圧縮降伏

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造(以下、RC 造)柱梁接合部の耐震性能に関しては、破壊が他の部材より先行せず、損傷が集中しないことが求められている。耐震性能を適切に評価するためには損傷度やエネルギー吸収能を予測する必要がある。しかし、既往の研究より柱梁接合部の挙動には多くの影響因子が存在し、それらが複雑に相関していることが報告されている。このため、実験のみで全ての因子の検討を行うことには限界があると考えられる。そこで、FEM 解析により、それらの因子の影響度を詳細に検討することができれば、損傷の低減、及びエネルギー吸収能の向上に貢献できると思われる。

現在、繰返し载荷を受ける RC 造柱梁接合部の解析精度は十分とは言えず、特にエネルギー吸収能が急激に低下するスリップ型履歴性状の再現性は不十分である<sup>1)</sup>。そこで、本研究では FEM 解析によるスリップ型履歴性状の再現性の向上を目的として、主要な影響因子と考えられるコンクリート-鉄筋間の付着性状に着目し、鉄筋の応力状態に応じて付着強度を変化させるモデルを考案した。本論文では考案した付着強度モデルの詳細と、その適用性について述べる。

## 2. 鉄筋応力に応じた付着強度モデル

### 2.1 鉄筋の応力状態が付着特性に及ぼす影響

森本ら<sup>1)</sup>は柱梁接合部内の梁主筋を想定した鉄筋の引抜き・押込み実験で、接合部内のかぶり、コアコンクリート領域で付着性状が異なることを報告している。図-1に実験結果の一部を示す。付着応力-すべり関係を比較すると、かぶり領域では押込み側の最大付着応力が引抜き側と比較して2倍近く大きくなっている。これは鉄筋

のポアソン効果による膨らみでコンクリートからの側圧が増したことによるものだと考えられる。また、コア領域では引抜き、押込み側で同様な履歴性状となっている。金らが行った鉄筋引抜き、押込み実験<sup>2)</sup>でも、押込み側の付着応力が引抜き側と比べて大きくなっている。

これまでの解析では引抜き側と押込み側で付着強度は同じであると仮定している。しかし、前述の実験より、引抜きと押込みでは付着特性に差が生じていることから、解析でもそれを反映することが実現象を精度良く再現するためには必要であると考えられる。

### 2.2 鉄筋応力に応じた付着強度モデルの考案

図-2 に鉄筋応力に応じて付着強度が変化する概念を示す。従来は図-2 (b) 中の黒線に示すような引抜きと押込みで付着強度が等しいと考えられてきたが、考案したモデルは、青線に示すように鉄筋降伏応力到達時の最大付着応力が引抜き側と押込み側で異なる。まず、付着強度が引張降伏時で  $0.5 \tau_{max}$  (基準付着強度)、圧縮降伏時に  $1.5 \tau_{max}$  と設定し、鉄筋が降伏するまでは線形に付着強度が変化するものとした。しかし、第3章で示す検証解

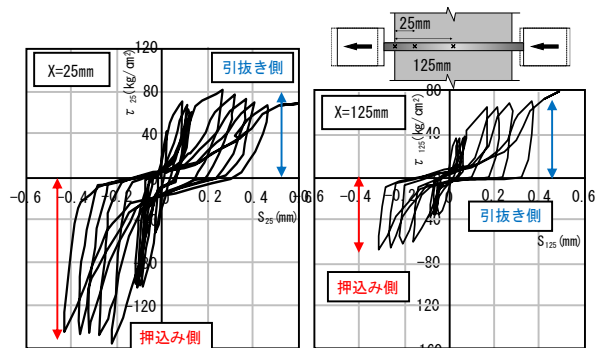


図-1 付着応力-すべり関係<sup>1)</sup>

\*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

\*2 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

\*4 京都大学大学院 工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

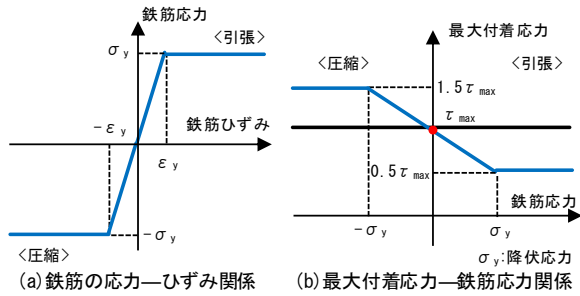


図-2 鉄筋応力に応じた付着強度モデルの概念

析よりこのモデルでは鉄筋の引抜き・押し込み実験<sup>2)</sup>の再現性が不十分な結果となった。また、図-8の実験結果を見ると引抜き側は基準付着強度  $\tau_{max}$  に到達していることが分かる。そこで、鉄筋が引張降伏する時の付着強度は  $\tau_{max}$  に固定し、圧縮降伏する時の付着強度を変化させて、その適用性を検討する。

### 3.鉄筋応力に応じた付着強度モデルの適用性

#### 3.1 解析対象試験体の概要

試験体は金らが行った鉄筋引抜き・押し込み実験<sup>2)</sup>より、付着長さが異なる2体を選び解析対象とした。表-1に試験体諸元、図-3に要素分割図及び断面図を示す。試験体は柱部材を想定したものであり、コンクリート強度は32.6 MPaである。試験体側面に軸力100 kNを加え、図-3に示すように鉄筋に引抜き力と押し込み力を与えている。両端部の150 mmは上下主筋とも付着絶縁区間となっており、中央部の付着長さがパラメータとなっている。なお、付着応力は鉄筋ひずみゲージ計測値から算出した。ひずみゲージは100mm間隔で両面に貼り付けている。試験区間400mmのS-19-L-(1/1)-100では鉄筋1本あたり5箇所×両面×4本=40箇所、試験区間800mmのL-19-L-(1/1)-100では鉄筋1本あたり9箇所×両面×4本=72箇所の計測となる。ひずみ計測値は応力に換算し、各区間の差から付着応力を求めた。

#### 3.2 解析モデル

コンクリートを六面体要素、鉄筋を線材要素でモデル化した。また、主筋とコンクリート間に接合要素を入れることで付着すべりを考慮した。試験体底面を固定し、鉄筋端部をローラー支持状態として荷重を与えた。材料構成則は以下を採用した。

##### (1) コンクリート

図-4にコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。圧縮側は修正Ahamadモデル<sup>3)</sup>、圧縮軟化後には要素寸法依存性を考慮したNakamura-Higaiモデル<sup>4)</sup>を採用した。引張側は出雲らのモデル<sup>5)</sup>、ひび割れ方向のせん断伝達特性には長沼の提案モデル<sup>6)</sup>を採用した。また、コンクリートの履歴則は文献7)に従った。

表-1 試験体諸元<sup>2)</sup>

試験体	付着長さ	主筋	せん断補強筋
S-19-L-(1/1)-100	400(mm)	2-D19 ( $f_y=840\text{MPa}$ )	2-D@100 ( $f_y=381\text{MPa}$ )
L-19-L-(1/1)-100	800(mm)		

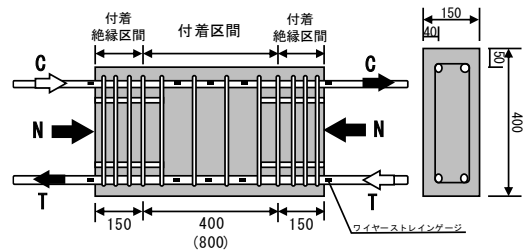


図-3 要素分割図及び断面図<sup>2)</sup>

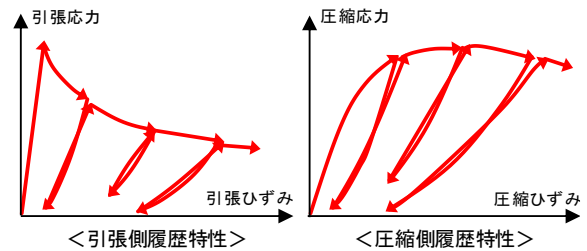


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

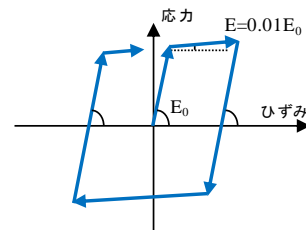


図-5 鉄筋の応力-ひずみ関係

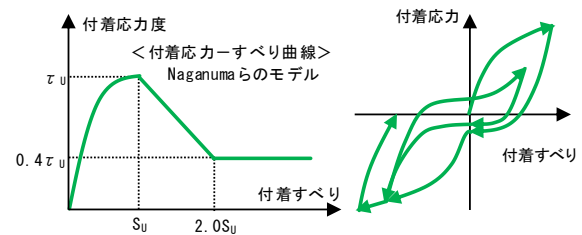


図-6 付着応力-すべり関係

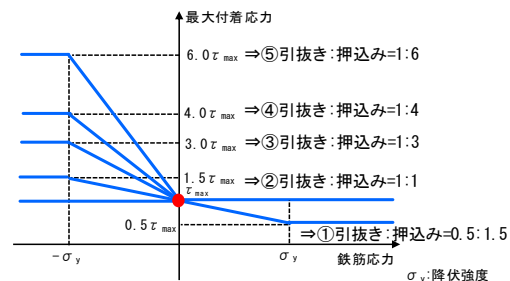


図-7 付着強度モデル

##### (2) 鉄筋

図-5に鉄筋の応力-ひずみ関係を示す。Bilinear型モデルとし、降伏後の剛性は初期剛性の1/100とした。また、繰返し応力下における履歴特性は直線型とした。

### (3) 付着性状

図—6 に付着応力—すべり関係を示す。付着応力—すべり曲線は Naganuma らのモデル<sup>8)</sup>を採用した。また、考案した付着強度モデルの適用性の検討を行うため、鉄筋が引張応力にある場合の付着強度を固定し、圧縮応力にある場合の付着強度を変化させた解析を実施した。図—7 に解析で検討した付着強度と鉄筋応力の関係を示す。当初検討した引抜き：押込み=0.5：1.5のモデル、引抜き側の付着強度に対する押込み側の強度の比率を3倍、4倍、6倍とした3ケース、強度一定モデルの計4ケースの解析を実施した。また、付着強度は文献<sup>9)</sup>より柱通し主筋の付着強度式を採用、強度時のすべりは文献<sup>10)</sup>を参照した。

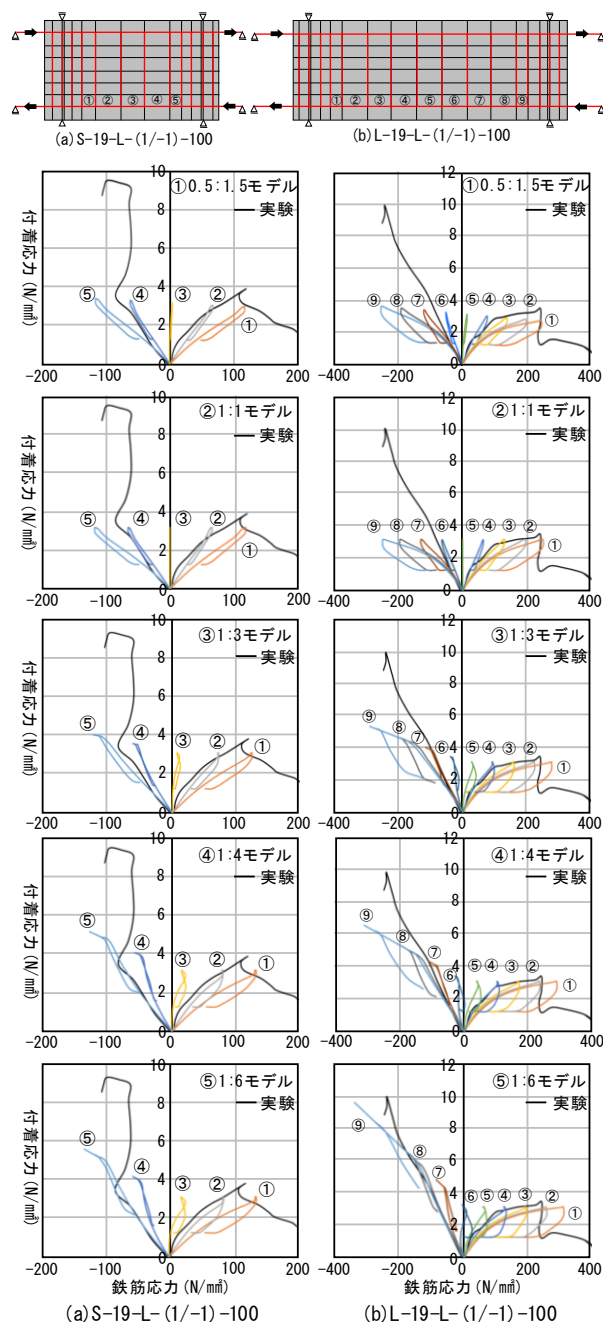
### 3.3 解析結果

図—8 に付着応力—鉄筋応力関係の実験及び解析結果の比較を示す。なお、解析結果は図—8 の要素分割図内の番号と対応する箇所の鉄筋応力—付着応力関係を抜粋したものである。2つの結果を比較すると、従来の付着モデルでは引抜き、押込み側で付着強度は同じであるが、強度差を大きくすることで解析結果に変化が見られた。押込み側の比率を大きくすると、付着応力差は徐々に大きくなり実験の挙動に近づいた。

しかし、2体の試験体の解析結果を比較すると異なる挙動を示した。付着長さが短い試験体 S-19-L-(1/-1)-100 では最も大きな強度差である引抜き：押込み=1：6のモデルを適用した場合でも押込み側の付着応力は引抜き側に対して、実験結果の約1/2程の大きさに止まった。また、付着長さが長い試験体と比較して押込み側の付着強度の上昇が小さくなった。

一方、付着長さが長い試験体 L-19-L-(1/-1)-100 は押込み側の比率を大きくすることで試験体 S-19-L-(1/-1)-100 と比べ、大きな付着応力の上昇が確認できた。また、引抜き側に対して押込み側の強度を6倍としたモデルでは最大付着応力時の鉄筋応力に差はあるものの、実験を概ね良好に模擬できた。

以上の結果より、付着強度の比率が引抜き側：押込み側=1:6の場合に実験の挙動を概ね模擬できることが分かった。しかし、付着長さによる適用性のばらつきが見られ、また、今回の検討では付着長さのみをパラメータにおいた実験を対象としている。付着性状に影響を与える因子として、かぶり厚さや補強筋量・主筋径なども挙げられ、これらが異なる場合の適用性についてはさらに検討が必要である。また、本検討では付着強度と鉄筋応力の関係を直線でモデル化したが、実験結果によると引抜き側は曲線、押込み側は直線で推移しており、異なる挙動を示している。これより、付着強度モデルが直線形状で良いかどうか、今後検討する余地がある。



図—8 付着応力—鉄筋応力関係

## 4. 柱梁接合部解析への適用性

### 4.1 解析対象試験体の概要

前章では提案した付着強度モデルの適用性を鉄筋の引抜き・押込み実験の解析により検討した。本章では実験との対応性が高かった引抜き：押込み=1：6の付着強度モデルを用いて繰返し荷重を受けるRC造柱梁接合部の履歴性状の再現精度を確認する。また、比較のため、押込み側の付着強度の比率を変化させた解析も併せて行う。対象試験体は塩原らの実験<sup>11)</sup>より正負交番繰返し荷重を受ける十字形柱梁接合部試験体 A1 とした。図—9 に要素分割図及び断面図を示す。コンクリート強度が 28.3 MPa、柱、梁の主筋比 2.25 %、帯筋比 0.43 %となっている。柱

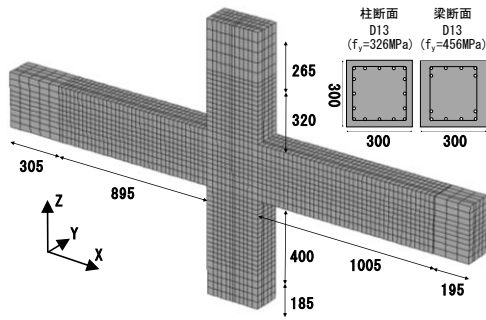


図-9 要素分割図及び断面図<sup>9)</sup>

梁曲げ強度比は 1.3 である。加力は柱頭、柱脚をピン支持、梁端をピン・ローラー支持で固定、柱頭に圧縮軸力を加え、正負交番繰返し载荷が行われた。

#### 4.2 解析モデル

試験体は対称性を考慮して奥行方向の半分を対象とした 1/2 モデルとした。境界面においては Y 方向の水平及び X, Z 方向の回転を拘束した。また、柱脚は中央の一系列を固定、梁端部はローラー支持となるように Y, Z 方向の水平及び X, Y, Z 方向の回転を拘束した。コンクリート、鉄板は六面体要素、鉄筋は線材要素でモデル化し。また、主筋-コンクリート間に接合要素を入れ、付着すべりを考慮した。材料構成則については、3 章で使用したものと同様である。なお、付着強度は接合部内の主筋と柱・梁の通し主筋でそれぞれの算定式を用いて計算した。図-10 に検討に用いた付着強度モデルを示す。鉄筋降伏時の付着強度は引抜き側 1 に対して押し込み側を 1, 3, 6(それぞれ, Model(a), (b), (c))とした計 3 ケースについて解析を行った。

#### 4.3 層せん断力-層間変形角関係

図-11 に層せん断力-層間変形角関係の実験と解析結果の比較を示す。付着強度を一定とした Model(a)の場合、耐力が低いサイクルもあるが良好に模擬した。しかし、変形角が大きくなると実験ではエネルギー吸収が急激に低下し、除荷時剛性が大きくなるスリップ型履歴性状が現われているが、解析では再現性が不十分であった。

一方、引抜き側と押し込み側で付着強度を変えたモデルを適用した解析の Model(b)と(c)では履歴性状に変化が確認できた。せん断力が零となる変形角が Model(a)と比較して大きくなり、除荷曲線の形状は実験を良好に模擬できた。また、押し込み側の付着強度を大きくした Model(c)では耐力も全サイクルで実験を良好に模擬する結果となった。

図-12 に各加力サイクルにおける層せん断力-層変形角関係の比較を示す。変形角が小さい 1.0% 加力サイクルでは、各モデルはほぼ同様な履歴を描く。変形角が大きくなると Model(b)と(c)は、除荷時剛性が大きくなり実験に近づく挙動を示した。しかし、変形角 4.0% の加力サ

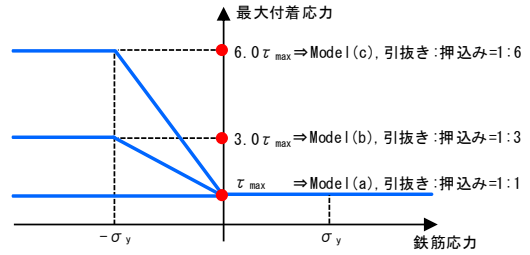


図-10 検討に用いた付着強度モデル

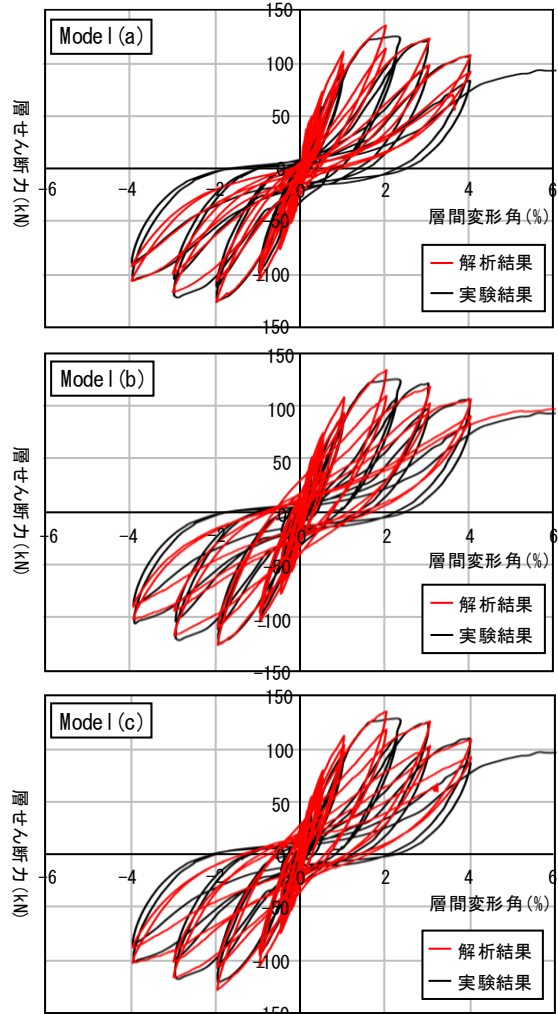


図-11 層せん断力-層間変形角関係

イクルになると実験の挙動を十分再現できていない。また、载荷域の曲線を比較すると Model(a)が実験を良好に模擬しており、付着強度を変えたモデルでは実験の挙動と差異が見られる。また、Model(b)と(c)の履歴ループは紡錘型に近い膨らんだ形状を示した。柱梁接合部の履歴性状に関しては付着性状以外の因子も影響している可能性があり、今後の検討が必要である。

#### 4.2 エネルギー吸収量

図-13 に各加力サイクルにおけるエネルギー吸収量の比較を示す。実験結果と比較して付着強度を一定とした Model(a)は変形角 2.0% サイクル以降では実験よりエ



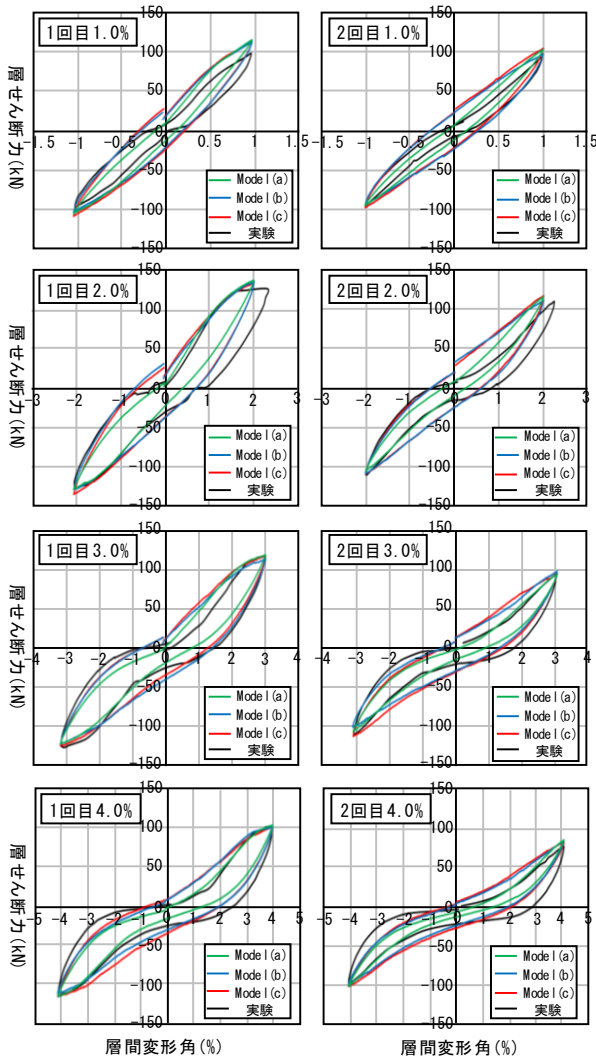


図-12 各加力サイクルの層せん断力-層間変形角関係の比較

エネルギー吸収量が小さくなった。解析では履歴ループが細く、エネルギー吸収能の再現性が不十分であることが分かる。一方、付着強度を変えた Model(b)と(c)では全てのサイクルにおいて実験よりエネルギー吸収量が大きくなった。特に、変形角 3.0%以降の加力サイクルでは実験結果の2倍近くまでエネルギー吸収量が大きくなるサイクルもあることが分かる。図-14に各サイクルの等価粘性減衰定数の比較を示す。等価粘性減衰定数は、1 サイクル分のエネルギー吸収量と等価剛性による弾性ひずみエネルギーの正負の平均値より算定した。実験では、変形角が大きくなるに従い等価粘性減衰定数も大きくなっている。Model(a)では、0.04~0.08 付近で増減し、一定の値で変化した。これは、履歴形状は層せん断力が零の時に変形角 0%付近になるようなループを描くため、小さな値で推移していると考えられる。一方、Model(b)と(c)は同様な傾向を示した。どちらも、0.10~0.18 の間で推移し、1回目変形角 3.0%加力サイクルで急激に上昇する。

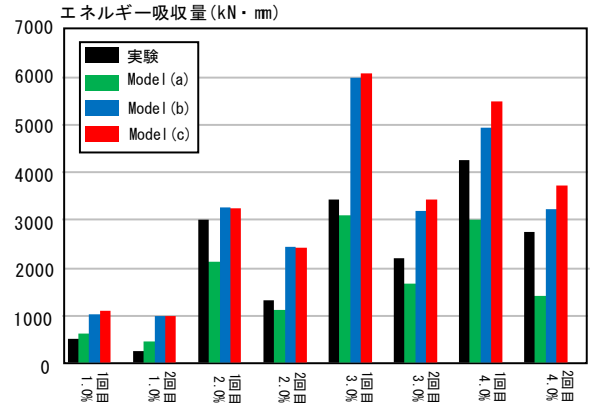


図-13 各加力サイクルのエネルギー吸収量の比較

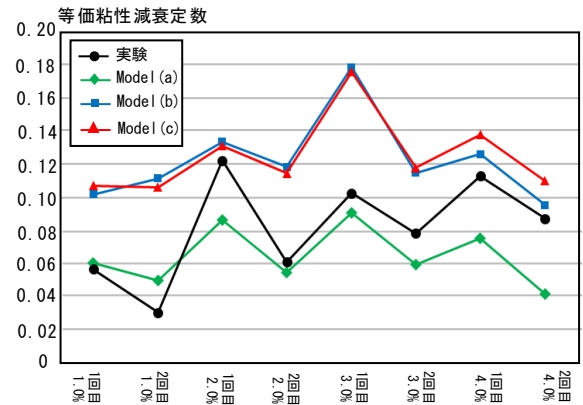


図-13 各加力サイクルのエネルギー吸収量の比較

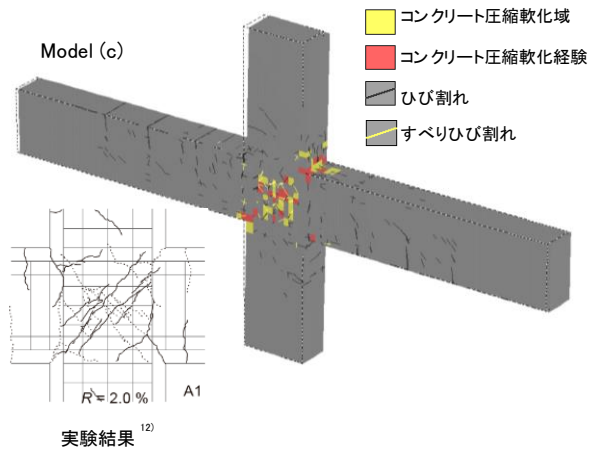


図-15 Model (c)のひび割れ性状(変形角 2.0%時)

このサイクルではエネルギー吸収量も急激に上昇する。付着強度を変えた Model(b)と(c)ではエネルギー吸収量、等価粘性減衰定数ともに付着強度を一定とした場合より上昇したが、実験を上回る大きな値となり、今後、検討が必要である。

#### 4.3 ひび割れ・破壊性状

図-15に Model(c)の最大耐力時のひび割れ性状を示す。実験における変形角 2.0%時のひび割れ性状<sup>12)</sup>も併せて示す。A1は柱梁曲げ強度比が 1.3と 1.0に近い値となっ

ているため、梁曲げ降伏後に接合部に損傷が集中する破壊(BJモード)となった。

付着強度モデルを適用した Model(b), (c)は同様な傾向を示した。梁のひび割れは等間隔にひび割れが発生した。また、接合部付近の柱のひび割れは、接合面付近の一部のみに発生した。これより、付着強度モデルの適用によってひび割れ性状の再現性の向上が確認できた。これは、分散ひび割れモデルで離散的にひび割れを表現する手法<sup>1)</sup>を用いたことによる効果もあると考えられる。しかし、解析では接合部にコンクリートの圧壊が集中する結果となった。実験では変形角 2.0%時には対角線上にひび割れは発生しているが、コンクリートの圧壊は生じておらず、接合部内の損傷状況の再現性は不十分であった。

実験では接合部の対角線上に発生する 2本の大きなひび割れが正負交番繰り返し载荷に伴って開閉を繰返し、変形角が大きくなると、接合部で負担するせん断力が急激に低下し、スリップ型現象が発生すると考えられる。しかし、分散ひび割れモデルによる解析ではそのようなひび割れの挙動を表現することが難しいため、今後、ひび割れのモデル化方法についても検討する必要がある。

## 5. まとめ

鉄筋の引抜き側と押込み側で付着強度が異なるモデルを考案し、鉄筋の引抜き・押込み実験、及び繰り返し载荷を受ける RC 造柱梁接合部の解析に適用した結果、以下のことが分かった。

- (1) 考案したモデルを鉄筋の引抜き、押込み実験の解析に適用した結果、引抜き側に対して押込み側の付着強度を 6 倍とすることで、付着長さが長い試験体では良好に実験を模擬できた。しかし、付着長さが短い試験体では押込み側の付着応力の上昇量が小さかった。
- (2) 繰り返し载荷を受ける RC 造柱梁接合部の解析に考案したモデルを適用した結果、履歴性状については除荷時剛性が大きくなり、スリップ型履歴性状の再現性向上が確認できた。
- (3) 考案モデルの適用によって、エネルギー吸収量、等価粘性減衰定数及びひび割れについても実験の傾向を模擬しており、再現性の向上が確認できた。

今後は柱梁接合部の履歴性状の再現性向上のために、付着強度の上昇率、コンクリートの応力状態などが接合部内梁主筋の付着分布に与える影響について検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 早坂香苗, 田嶋和樹, 長沼一洋: 繰り返し载荷を受ける

RC 造柱梁接合部の履歴性状の解析精度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.235-240, 2017

- 2) 森本敏行, 林静雄, 吉田俊夫, 黒正清治: 押込み力と引抜き力を同時に受けるはり主筋の付着性状に関する実験研究, 日本建築学会論文報告集, 第 322 号, pp.52-62, 昭和 57 年 12 月
- 3) 金吉熙, 佐藤裕一, 藤井栄: RC 柱部材におけるせん断抵抗機構と主筋付着作用の関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 559 号, pp.181-188, 2002.9
- 4) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 5) Nakamura, H, Higai, T: Compressive Fracture Energy and Failure Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999.10.
- 6) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 7) 長沼一洋: 鉄筋コンクリートの壁状構造物の非線形解析手法に関する研究(その1), 日本建築学会構造系論文報告集, 第 421 号, pp.39-46, 1991.3
- 8) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰り返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造論文集, 第 536 号, pp.135-142, 2000 年 10 月
- 9) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August., 2004.
- 10) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 11) fib Model Code 2010. Fédération Internationale de la Précontrainte, Lausanne, Switzerland, pp.233-239
- 12) 塩原等, 岡田浩一, 楠原文雄: 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部のベンチマークテスト, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.421-426, No.2, 2005
- 13) 楠原文雄, 塩原等: 多軸複合応力を受ける鉄筋コンクリート造柱梁接合部の復元力特性と損傷特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.235-240, No.3, 2007
- 14) 佐藤裕一, 長沼一洋: 分割ひび割れモデルによる鉄筋コンクリートのひび割れ幅の予測, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.61B, pp.111-124, 2015 年 3 月