

論文 RC造柱梁接合部のひび割れ開閉挙動が耐震性能に及ぼす影響に関する研究

早坂 香苗*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3

要旨：繰返し荷重を受ける RC 造柱梁接合部の履歴性状や損傷を解析により精度良く評価するために、接合部パネルのひび割れ開閉挙動に着目した検討を行った。接合部での大きな開口とずれが生じる斜めひび割れの挙動を考慮するため、離散ひび割れモデルを導入し、既往の実験の解析に適用した。その結果、繰返し荷重を受ける際に現れる接合部パネルのひび割れ開閉挙動の再現及び耐力やスリップ型履歴性状に関する解析精度の向上が確認できた。

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, 離散ひび割れ

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、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。耐震性能の適切な評価を行うためには、損傷やエネルギー吸収能を正確に予測する必要がある。しかし、既往の研究より地震動を受ける柱梁接合部の挙動には多くの影響因子が存在し、それらの因子は複雑に関わっていることが報告されている。そのため、実験のみで全ての因子の影響度の検証を行う事には限界があると考えられる。そこで FEM 解析を用いた影響因子の詳細な検討を行うことが出来れば、損傷の低減及びエネルギー吸収能の向上につながると考えられる。

現在、繰返し荷重を受ける RC 造柱梁接合部の解析精度は十分と言えず、特に大変形時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ったり。そこで、本論文では FEM 解析におけるスリップ型履歴性状の再現性向上を目的とし、影響因子の 1 つと考えられる接合部パネルのひび割れ開閉挙動に着目し、接合部パネルの対角線上に離散ひび割れを挿入することでひび割れ開閉挙動を再現したモデルの構築及びその適用性について述べる。

2. ひび割れ開閉を考慮したモデルの構築

2.1 接合部パネルのひび割れ開閉挙動の影響

塩原らは既往の実験に基づき、繰返し荷重を受ける接合部破壊が先行する RC 造柱梁接合部の変形機構を提案している^{2) 3)}。図-1 に変形機構の概要を示す。柱梁接合部において正負交番荷重によって、X 型の斜めひび割れが発生し、4 つの三角形のパネルに分割される。この

時、ひび割れ面を介してコンクリートの引張力は伝達されないため、変形が与えられるとコンクリートに回転する変形が強制される。その結果、図-1 に示すような一部が閉じ、一部が拡大するようなひび割れ性状となる。このひび割れが拡大することで、接合部パネルのせん断変形が増え、コンクリートの圧縮力の伝達が発生する。このため、耐力は接合部破壊後に一定もしくは増加することが報告されている²⁾。

以上より、接合部パネルの X 型のひび割れ開閉挙動は柱梁接合部の応力伝達や破壊性状に大きな影響を与えていると考えられる。そこで、このひび割れ開閉挙動をできるだけ忠実に再現することが、解析による耐震性能の評価のためには重要と考えられる。

2.2 解析モデル構築

(1) 解析対象試験体概要

試験体は楠原らが行った正負交番荷重を受ける RC 造柱梁接合部実験⁴⁾より、柱梁曲げ強度比及び梁筋筋量をパラメータとした B シリーズより 6 体を抜粋した。表-1, 2 に試験体概要及び使用鉄筋の材料特性を、図-2 に荷重装置概要を示す。コンクリート強度は 29.0MPa であ

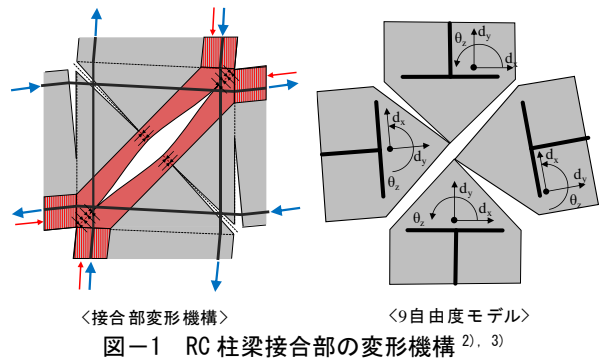


図-1 RC 柱梁接合部の変形機構^{2), 3)}

*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)

表-1 試験体概要⁴⁾

試験体	B01	B02	B03	B04	B05	B06	
梁	断面 240mm × 240mm						
	引張鉄筋	4-D13	5-D13	5-D16	4-D13	5-D13	
	引張鉄筋比	0.98	1.22	1.92	0.98	1.22	
柱	断面 240mm × 240mm						
	引張鉄筋	4-D13	5-D13	5-D16	6-D13	5+2-D13	5+5-D13
	引張鉄筋比	0.98	1.22	1.92	1.47	1.8	2.67
接合部	横補強筋	□-D6 × 2					
	横補強筋比	0.28					
柱梁曲げ強度比	1.00	1.00	1.00	1.48	1.35	1.77	

表-2 鉄筋の材料特性⁴⁾

		降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (MPa)	引張強度 (MPa)
柱・梁主筋	D13(SD345)	378	188000	547
	D16(SD390)	425	192000	613
補強筋	D6(SD295A)	399	204000	531

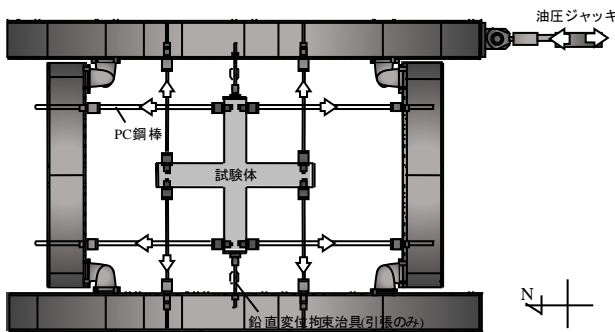


図-2 荷装置の概要⁴⁾

り、加力は軸力を与えない状態で、両端ピン接合の柱より支持された上部加力梁の南端部の油圧ジャッキより水平力を加え、加力フレームに水平力を生じさせることで、地震時における架構の変形を生じさせている。

(2) 解析モデル

図-3 に要素分割図を示す。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 モデルを作成した。境界面においては Y 方向の並進及び X, Z 方向の回転を拘束した。また、柱脚の中央の一行を固定、梁端部の荷装置接合部はローラー支持となるように Y, Z 方向の並進及び X, Y, Z 方向の回転を拘束した。モデルは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、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。

ひび割れ開閉をできるだけ忠実に再現するため、図-3(b) に示すように接合部パネルの対角線上に離散ひび割れを表現する接合要素を入れることで X 型ひび割れ開閉を考慮した(離散ひび割れモデル)。なお、対角線部以外には分散ひび割れモデルを適用した。また、ひび割れのモ

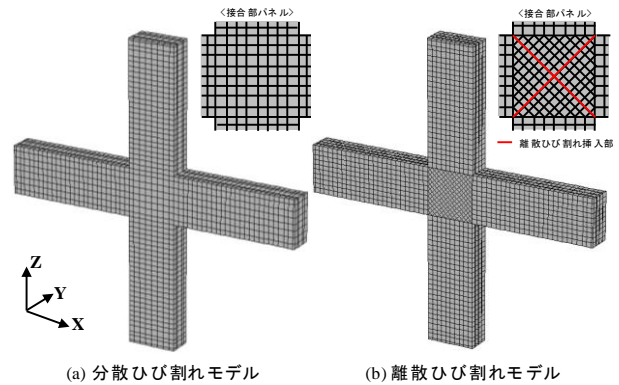


図-3 解析モデルの要素分割図

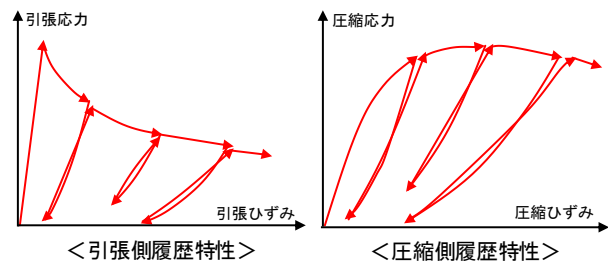


図-4 コンクリートの応力-ひずみ関係

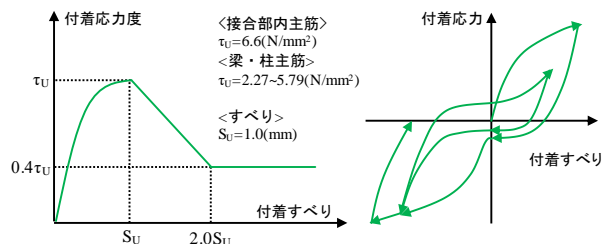


図-5 付着応力-すべり関係

デル化手法の違いによる影響を確認するため分散ひび割れを用いたモデル(分散ひび割れモデル)も併せて作成した。

(3) 各種材料構成則

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⁵⁾、圧縮軟化後には要素寸法の依存性を考慮した Nakamura-Higai モデル⁶⁾を採用した。引張側は長沼・山口のモデル⁷⁾、ひび割れ後のせん断伝達特性には長沼の提案モデル⁸⁾を採用した。また、コンクリートの履歴則は文献⁹⁾に従った。鉄筋の応力-ひずみ関係は 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。図-5 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¹⁰⁾を採用した。また、付着強度は文献¹¹⁾より接合部内主筋は接合部内通し配筋する場合の付着強度式を、柱・梁通し主筋は信頼付着強度式を用いて計算し、付着強度時のすべりは文献¹²⁾を参照した。

3. 解析結果

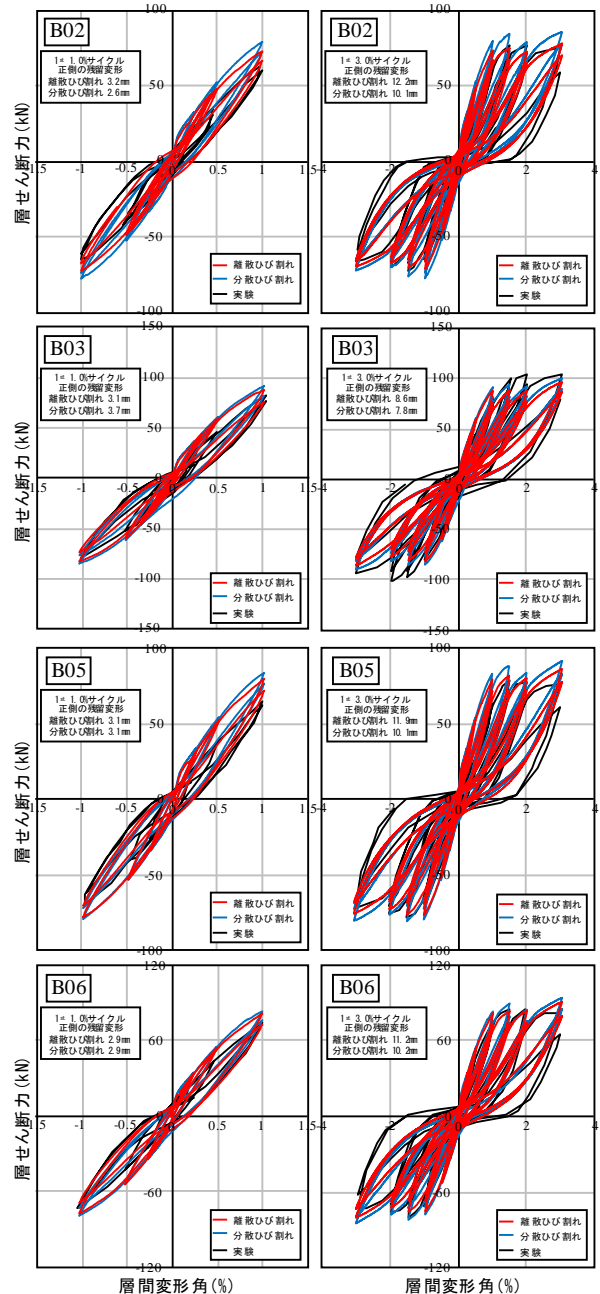
3.1 層せん断力—層間変形角関係

図-6 に層せん断力—層間変形角関係の実験及び解析結果の比較を示す。B01 及び B04 に関しては実験と良好に対応し、分散及び離散ひび割れモデルの結果が B02 と同じ傾向を示したため、ここでは B02, 3, 5, 6 の結果を示す。なお、図-6(a)には層間変形角 1.0%サイクルまでの結果、(b)に実験終了時までの結果を示す。全ての試験体で、ひび割れ開閉挙動を再現した離散ひび割れモデルが分散ひび割れモデルよりも各サイクルの層せん断力の低下が見られ、実験の傾向に近づくことが確認できた。しかし、B03 に関してどちらのモデルも層間変形角 1.5% サイクル以降は実験よりも低い耐力で変形が推移した。これは、解析では変形が小さい段階で接合部パネルのコンクリートの損傷が急激に進行したためと考えられる。

履歴性状を比較すると B02, B05 では大変形時サイクルの層せん断力が 0 になる残留変形が、離散ひび割れモデルが分散ひび割れモデルと比較して大きくなっており、除荷曲線が実験の挙動に近づき、スリップ型履歴性状の再現性の向上が確認できた。しかし、その他の試験体では若干の変化はあるものの履歴性状及び除荷曲線に大きな変化は見られなかった。この再現性の違いは破壊性状の違いにあると考えられる。離散・分散ひび割れモデルで除荷曲線に大きな変化が確認できなかった試験体は、B01 を除き柱梁曲げ強度比が 1.0 以上であり、接合部パネルの損傷が小さい梁曲げ型破壊あるいは梁曲げ降伏先行の接合部破壊であったことが推測できる。そのため、履歴性状も履歴ループが膨らんだ紡錘型に近い形状を示している。これにより、接合部の損傷度が低い試験体では、ひび割れ開閉挙動の履歴性状への影響度は少ないと推測でき、スリップ型履歴性状の再現性のばらつきが出たのもそのためだと考えられる。

3.2 ひび割れ性状

図-7 に B02 の接合部パネルのひび割れ性状、図-8 に各サイクルの接合部対角線上に発生するひび割れ幅を示す。なお、ここでのひび割れ幅はある点のかぶり〜奥行方向一列の接合要素の開口量の平均値を示している。離散ひび割れモデルの接合部パネルの対角線上に発生するひび割れを確認したところ、繰返し载荷によるひび割れ開閉及び既往の実験で報告されている隅部で閉じ、中央でひび割れが拡大する性状の再現が確認できた。ひび割れ幅は試験体によってばらつきはあるものの隅部が 1.5mm~2.5mm、中央部は 2.0mm~3.5mm となった。論文³⁾中にはひび割れ幅の記載はなかったため、耐震性能評価指針¹³⁾との比較を行い、解析モデルの妥当性の検証を行った。文献¹³⁾より接合部に発生する経験最大せん断ひび割れ幅は、最大耐力時に縮小試験体



(a) 層間変形角 1.0% サイクルまで (b) 層間変形角 3.0% サイクルまで

図-6 層せん断力—層間変形角関係

は約 1.0mm、実寸試験体は約 2.0mm となることが記載されている。今回の解析結果は、耐震性能評価指針よりやや大きな値となったが、逸脱した値ではないため解析モデルの妥当性はあるものと考えられる。

図-9 にひび割れ性状の解析結果を示す。ここでは、柱梁曲げ強度比が異なる B02, B06 の分散ひび割れ、離散ひび割れモデルの層間変形角 2 回目 2.0% 時の結果を示す。どちらも柱梁曲げ強度比が小さい B02 では接合部に損傷が集中しているが、柱梁曲げ強度比が大きい B06 は梁端部の損傷の集中及び接合部の損傷の低減が見られ、柱梁曲げ強度比によるひび割れ性状の違いの再現が確認できた。また、2つの解析モデルを比較すると柱・梁の

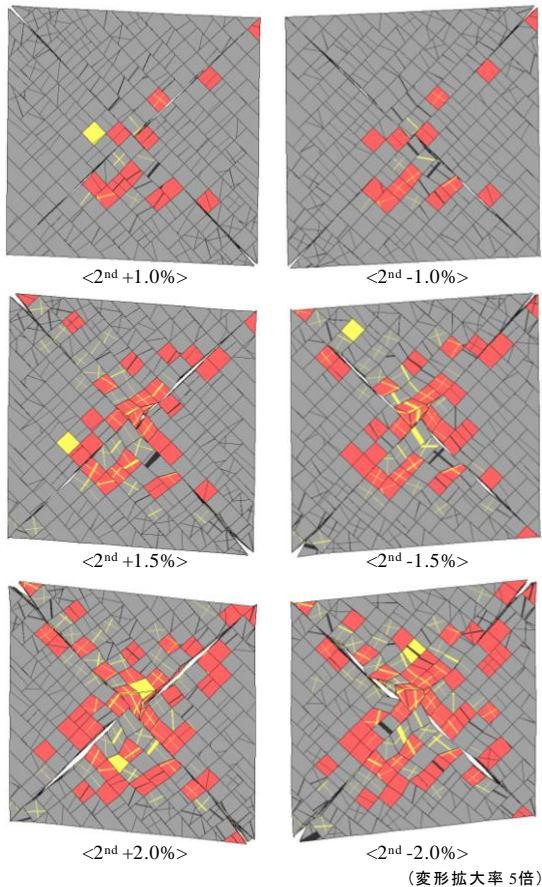


図-7 B02の接合部パネルのひび割れ性状

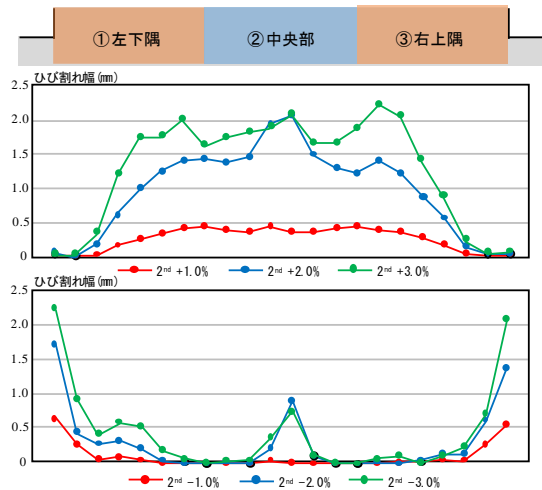


図-8 解析における各サイクルの接合部パネルに生じるひび割れ幅

ひび割れ性状に大きな違いは見られなかった。接合部パネルのひび割れ性状を比較すると、コンクリートの損傷度に大きな違いは見られなかった。しかし、離散ひび割れモデルでは接合部の対角線で分割された境界面に沿ってコンクリートの圧壊が拡大していった。これは、境界面におけるコンクリート要素の接触によって圧壊が生じたものと考えられる。

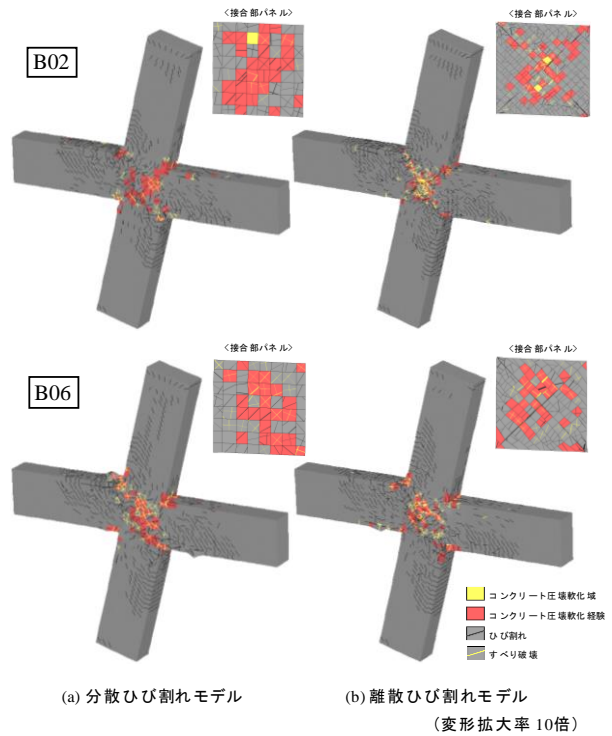


図-9 ひび割れ性状 ($2^{nd} +2.0\%$ 時)

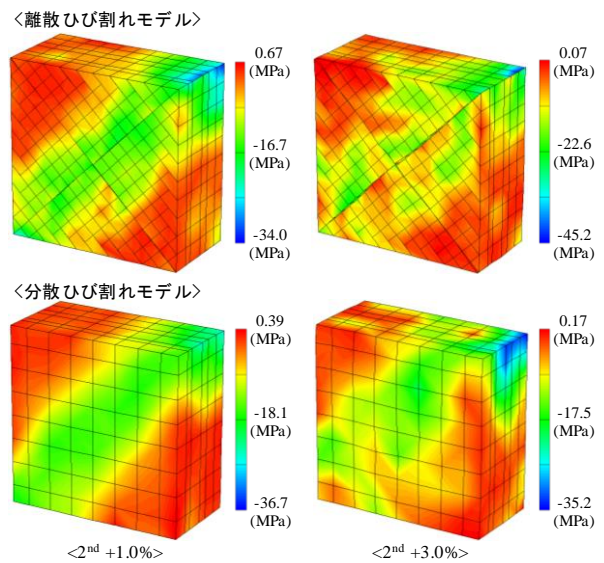


図-10 B02の接合部パネルの最小主応力図

3.3 接合部パネルの圧縮ストラット

図-10にB02の層間変形角2回目+1.0%及び2回目+3.0%時の接合部パネルの離散ひび割れモデル・分散ひび割れモデルの最小主応力図を示す。分散ひび割れモデルの層間変形角+1.0%時では対角線上に一樣に圧縮ストラットの形成が見られたが、変形が大きくなると接合部パネルの圧縮ストラットは徐々に幅を広げ、一樣に形成できないことが確認できた。次に離散ひび割れモデルでは、層間変形角+1.0%では分散ひび割れモデル同様に、圧縮ストラットを形成していることが分かる。しかし、層間変形角3.0%時では一部が引張力、一部が圧縮力と分

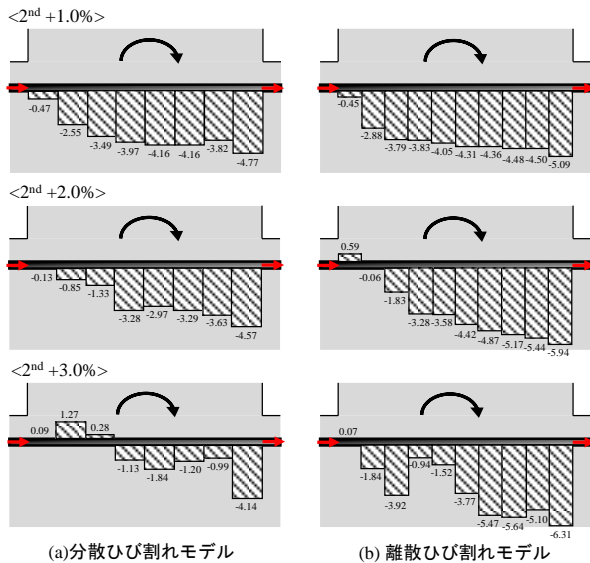


図-11 B02の接合部内梁主筋の付着応力分布(N/mm²)

散ひび割れモデルとは異なる様相を示した。また、分散ひび割れモデルよりも早期に圧縮ストラットの消失が見られた。

接合部パネルのせん断変形が大きくなると、圧縮ストラットの幅は広がり、接合部破壊と共に消失していく。この原因の1つと考えられることは接合部内梁主筋の付着劣化である。そこで、図-10にB02の2回目層間変形角+1.0%、+2.0%、+3.0%時の梁上端筋の付着性状を示す。どちらのモデルも、層間変形角2.0%時までは付着劣化が見られなかった。しかし、層間変形角3.0%時に分散ひび割れモデルでは中央部鉄筋の付着応力の低下が確認でき、付着劣化が圧縮ストラットの幅の拡大及び消失の原因であると考えられる。しかし、離散ひび割れモデルでは中央部鉄筋の一部で付着応力の低下が見られたが、端部では層間変形角+2.0%時と変わらない付着応力が発現していることが分かった。このため、離散ひび割れモデルの圧縮ストラットの消失の原因が梁主筋の付着劣化が主要因であるとは断定できない。圧縮ストラット消失についてこの他に考えられる原因として、4つに分割された接合部パネル同士の応力伝達や接合部パネルコンクリートの損傷などが挙げられ、今後検討する必要がある。

3.4 エネルギー吸収量・等価粘性減衰定数

図-11にB02の各サイクルのエネルギー吸収量の比較を示す。分散・離散ひび割れモデル共に層間変形角2.0%サイクルまでのエネルギー吸収量は、実験と比較するとやや大きな値となった。層間変形角3.0%のサイクルでは大きくなるが、実験値に近い値で推移していることが分かった。変形が小さい時のエネルギー吸収量が大きくなる原因として、解析結果が実験よりも耐力が大きくなったことが考えられる。また、大変形時では解析によるスリップ型履歴性状の再現性は不十分ではあったが、

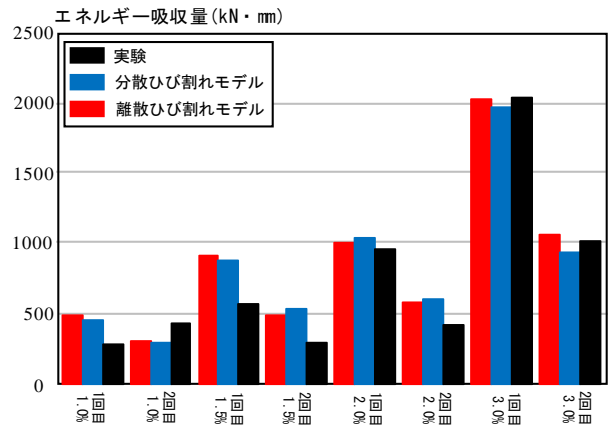


図-12 B02のエネルギー吸収量の比較

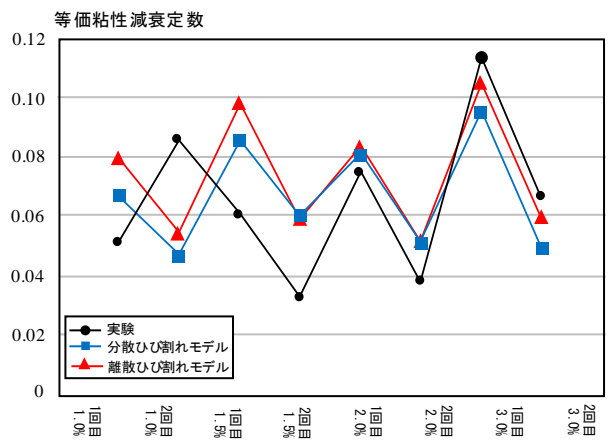


図-13 B02の等価粘性減衰定数の比較

エネルギー吸収量はほぼ対応した。2つの解析モデルの結果を比較すると、エネルギー吸収量に大きな違いは見られなかった。

図-12にB02の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出した。実験は層間変形角2.0%までは0.04~0.08の間で推移し、層間変形角3.0%サイクルで一気に上昇した。一方、解析では0.05~1.00の間を推移し、層間変形角3%では実験と同様に上昇した。また、2つの解析モデルを比較すると離散ひび割れモデルの方が分散ひび割れモデルよりも若干大きくはなるが、ほぼ同じ値で推移した。これは、どちらのモデルも履歴ループが層間変形角0%に近い値でせん断力が0となる履歴性状となっているためだと考えられる。しかし、大変形時にはエネルギー吸収量同様に実験結果に近づく挙動を示した。変形が小さい時のエネルギー吸収量及び等価粘性減衰定数の再現性については今後検討の余地がある。

以上の結果より、離散ひび割れを用いて接合部パネルのひび割れ開閉挙動を考慮したモデルでは、スリップ型履歴性状の再現性が向上した試験体があることが分かっ

た。しかし、接合部破壊が顕著ではない試験体ではひび割れ開閉を考慮していないモデルと変わらず、スリップ型履歴性状の再現性が不十分な結果となった。他に考えられる要因としては接合部内梁主筋の付着性状であり、ひび割れ境界面近傍の鉄筋の抜け出しに影響があると考えられる。既往の実験より接合部内梁主筋の付着性状は引張側と圧縮側で付着性状が異なることが報告されている¹⁴⁾。森本らは接合部内梁主筋を模した鉄筋の押し込み力、引抜き力を同時に与えた場合、かぶりコンクリート領域では押し込み側の付着応力は引抜き側の付着応力が2倍近く大きくなったことが分かっており、解析においても引抜き側と押し込み側の付着強度差を設ける必要があると考えられる。

4. まとめ

繰り返し载荷を受ける RC 造柱梁接合部の解析において離散ひび割れを導入した接合部パネルのひび割れ開閉挙動を考慮したモデルの構築を行い、既往の実験の解析に適用した結果、以下のことが分かった。

- (1) 最大耐力は実験結果と良好に対応したが、スリップ型履歴性状の再現性については試験体の破壊性状によって違いが見られた。
- (2) 柱梁曲げ強度比の違いによる接合部コンクリートや梁部材の損傷度の違いが解析でも再現できた。
- (3) 離散ひび割れモデルを用いたことで、圧縮ストラットの形成及び消失に変化が現われた。また、梁主筋の付着劣化が消失が主要因とは断定できない。
- (4) エネルギー吸収量と等価粘性減衰数については、ひび割れのモデル化方法の違いによる大きな差異は確認できなかった。

今後は、鉄筋応力に応じて付着強度が変化するモデル¹⁵⁾を用いて、解析精度向上に関する検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 早坂香苗, 田嶋和樹, 長沼一洋: 繰返し载荷を受ける 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.235-340, 2017
- 2) 楠原文雄, 塩原等: 接合部破壊が先行する RC 造柱はり接合部の接合部せん断力と接合部破壊の因果関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.2, pp.1005-1010, 1997

- 3) 塩原等: 鉄筋コンクリート柱梁接合部: 見逃された破壊機構, 日本建築学会構造計論文集, 第 73 巻, 第 631 号, pp.1641-1648, 2008.9
- 4) 楠原文雄, 塩原等, 田嶋渉, 朴星勇: 柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 75 巻, 第 656 号, pp.1873-1882, 2010.10
- 5) 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
- 6) Nakamura.H, Higai.T: Compressive Fracture Energy and Fracture 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
- 7) 長沼一洋, 山口恒雄: 面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.649-650, 1990.10
- 8) 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
- 9) 長沼一洋, 大久保雅章: 繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル, 日本建築学会構造系論文集, 第 536 号, pp.135-142, 2000.10
- 10) 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
- 11) 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
- 12) fib Model Code 2010.Fédération Internationale de la Précontrainte, Lausanne, Switzerland, pp233-239
- 13) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 2004
- 14) 森本敏幸, 林静雄, 吉田俊夫, 黒正清治: 押し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, 日本建築学会論文集, 第 322 号, pp.52-63, 昭和 57 年 12 月
- 15) 早坂香苗, 田嶋和樹, 長沼一洋, 佐藤裕一: 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, コンクリート工学年次論文, Vol.40, No.2, pp.235-240, 2018