

論文 有限要素法による鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の 2次元非線形解析

小川 勤^{*1}・澤田 智史^{*1}・安達 洋^{*2}・中西 三和^{*2}

要旨：本論文は，過去に実施した鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）ト形柱梁接合部の静的及び動的載荷実験^{1),2),3),4)}の中で，柱軸力が一定での機械式定着法及び U 字型定着法を用いた静的載荷試験体を解析対象として，2次元非線形有限要素法解析を行い，解析結果から定着法の違いが接合部の性能に及ぼす影響を解析的に調べたものである。最初に接合部内の応力状態や損傷状態を再現可能な解析手法の確立を目的とし，接合部の非線形性を表現するために仮定した要素モデルと各材料構成則を示し，次に解析結果より荷重-変形，破壊状況，梁主筋のひずみを算出し各種変形レベルでの実験結果と解析結果を詳細に検討した。

キーワード：有限要素法，ト形柱梁接合部，機械式定着法，U字型定着法，

1. はじめに

兵庫県南部地震以前における我が国の RC 造建物の地震被害では，柱，梁部材などの被害例は多数報告されているが，柱梁接合部の被害報告は少ない。しかし，近年，コンクリートや鉄筋の高強度材料の使用が普及するとともに，従来よりも部材断面が小さくなり，接合部は骨組内で相対的に弱点となることが指摘されている。そして，耐震規定にも接合部の設計が盛り込まれるようになった。1995年の兵庫県南部地震では，比較的新しい RC 造建物で接合部の被害例が，いくつか報告され，地震時に構造物全体の变形性能に大きく影響を及ぼす柱梁接合部の破壊挙動を把握し，接合部での各種限界状態における損傷量を詳細に評価することは建物を設計する上で重要な課題であることが指摘されるようになった。このような背景から，高層 RC 造建物の下層部ト形柱梁接合部を対象とし，地震時の建物の挙動を想定した動的及び静的載荷実験を実施し，接合部の破壊挙動を詳細に調べてきた。^{1),2),3),4)}

本論文では，これら RC 造ト形柱梁接合部の実験

で用いた試験体の中から，柱に一定軸力を負荷し梁主筋を機械式定着及び U 字型定着した試験体を対象とし，2次元非線形 FEM 解析を行った。

本研究では，まず接合部内の応力状態や損傷状態を再現可能な解析手法の確立を目的とし，接合部の非線形性を表現するために仮定した要素モデルと各材料構成則を示した。

次に，解析結果より荷重-変形，破壊状況，梁主筋のひずみ等を算出し，各変形レベルでの実験結果と解析結果を比較し，本解析モデルの妥当性を検証している。また，定着法の違いが接合部の性能に及ぼす影響を解析的に調べたものである。

2. 解析概要

2.1 試験体概要

試験体の諸元を表-1に示す。解析の対象は，文献1)~4)の実験で用いた高層 RC 造建物の下層部外柱梁接合部を想定した実建物の約 1/3スケールのト形柱梁接合部試験体（試験体名：NUCS，BUCS，NMCS，BMCS）4体である。これらの試験体は，梁端部曲げ降伏が先行するよ

*1 日本大学大学院 理工学研究科海洋建築工学専攻 工修（正会員）

*2 日本大学 理工学部海洋建築工学科教授 工博（正会員）

うに設計したせん断余裕度の高いNタイプと、接合部せん断強度と梁曲げ強度が拮抗するせん断余裕度が低いBタイプの2種類である。更に両タイプの試験体で、接合部内の梁主筋の定着に機械式とU字型を用いたものである。

2.2 解析モデル

図-1に解析試験体の要素分割図を示す。コンクリート及び載荷板、支承板は、4節点アイソパラメトリック平面応力要素で表現し、主筋は2節点トラス要素を用いて離散化し付着すべりを考慮した。補強筋は埋込鉄筋要素で完全付着である。図-1における点線部は、離散化ひび割れを界面要素で表現した。加力方法は荷重制御で柱に一定軸力を載荷した状態で梁に水平力を変位制御により載荷した。尚、解析には汎用構造解析プログラムDIANA7.2を用いた。⁵⁾

(1) コンクリート

コンクリートの材料特性を表-2に、コンクリート圧縮側モデルを図-2に示す。コンクリートは、弾塑性体と仮定し、破壊基準としては、Drucker-Pragerの降伏基準を用い、内部摩擦角を 35° とした。コンクリートの圧縮上昇域においては、圧縮強度の $1/3$ までは弾性体とし、2直線でモデル化した。圧縮強度時のひずみ(m)は、次式により算定した。

$$m = 1.49 \times 10^{-5} \times f_c + 0.00195 \quad (1)$$

f_c : コンクリート圧縮強度 (MPa)

圧縮強度後の下降域においては、圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})を考慮し、直線でモデル化している。圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})は次式で算定した。⁶⁾

$$G_{Fc} = 8.8 f_c \text{ (N/mm)} \quad (2)$$

また、要素代表長さ(L_c)は、要素面積 A と同じ面積を持つ円の直径($L_c = \sqrt{4A/\pi}$)としている。ひび割れたコンクリートの圧縮強度の低減を考慮するため、低減係数として()を用い、コンクリート有効圧縮強度を(f_c)とした。⁷⁾

次に、コンクリートの引張軟化域の破壊力学パラメータを表-3に、コンクリートの引張側モ

表-1 解析対象試験体及び試験体諸元

試験体名	梁		柱		接合部	せん断余裕度	梁主筋定着法
	主筋	補強筋	主筋	補強筋	補強筋		
NMCS	6-D16 (SD490)	2-D10@100 (SD295)	12-D19 (SD490)	2-D10@75 (SD295)	2-D10@75 (SD295)	1.601 (N type)	機械式 (M)
NUCS		Pw:0.55%		Pw:0.64%	Pwj:0.64%	1.601 (N type)	U字型 (U)
BMCS	10-D16 (SD345)	2-D6@75 (SD295)	12-D16 (SD345)	2-D6@50 (SD295)	2-D6@50 (SD295)	0.955 (B type)	機械式 (M)
BUCS		Pw:0.33%		Pw:0.43%	Pwj:0.43%	1.011 (B type)	U字型 (U)

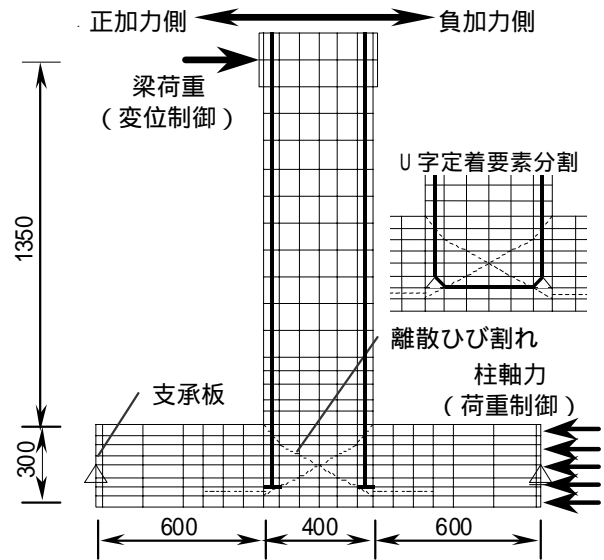


図-1 試験体要素分割図

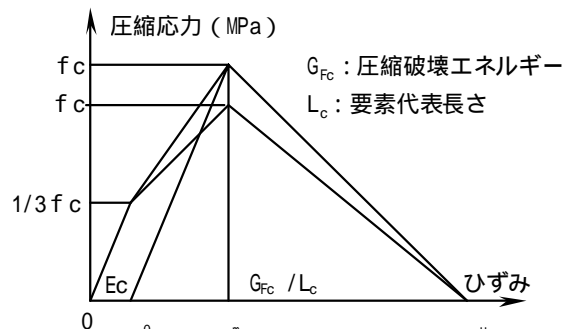


図-2 コンクリート圧縮側モデル

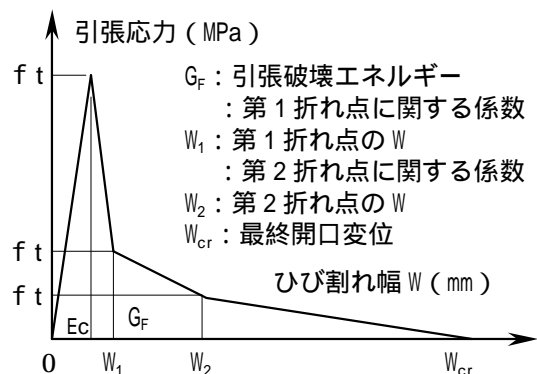


図-3 コンクリート引張側モデル

デルを図 - 3 に示す。コンクリート引張側のひび割れの判定基準としては、Tension cut-off 基準を用い、コンクリートの引張強度及びヤング係数は、靱性保証型設計指針より決定した。

引張上昇域は、引張強度(f_t)までを弾性とし、ピーク後の下降域は、図 - 3 に示すように3直線でモデル化を行った。破壊エネルギー (G_F) は次式により算定した。⁸⁾

$$G_F = (0.23f_c + 136) / 100 \text{ (N/mm)} \quad (3)$$

クラックひずみ (ϵ_{cr}) は、ひび割れ幅 (W) を要素代表長さ (L_c) で除することで算定した。

$$\epsilon_{cr} = W / L_c \quad (4)$$

ひび割れ後のコンクリートのせん断剛性低下率 (β) は、次式により定義している。⁵⁾

$$\beta = 1 / (1 + 4447 \epsilon_{cr}) \quad (5)$$

(2) 主筋及び補強筋

主筋及び補強筋の材料特性を表 - 4 に示す。鉄筋には、Von Mises の降伏基準を用い、応力ひずみ関係は bi-linear モデルを仮定し、第 2 勾配の剛性はヤング係数の 1/100 とした。また、ヤング係数は、205GPa と仮定した。

(3) 付着特性

付着は、図 - 4 に示すような付着-すべりモデルを適用し、既往の柱梁接合部における付着モ

表 - 2 コンクリートの材料特性

試験体名	圧縮強度 f_c (MPa)	圧縮強度時ひずみ $\epsilon_c (\mu)$	ヤング係数 E_c (GPa)	圧縮破壊エネルギー G_{Fc} (N/mm)
NMCS	41.58	2570	29.99	56.74
NUCS	42.40	2580	30.80	57.30
BMCS	25.89	2336	23.66	44.78
BUCS	18.60	2220	20.10	37.97

表 - 3 引張軟化域の破壊力学パラメータ

試験体名	引張強度 f_t (MPa)	破壊エネルギー G_F (N/mm)	係数				
			W_1	W_2	W_{cr}	α	β
NMCS	2.03	0.14	0.035	0.14	0.36	0.4	0.1
NUCS	2.04	0.14					
BMCS	1.59	0.14					
BUCS	1.36	0.14					

表 - 4 鉄筋の材料特性

	鉄筋径	断面積 (mm ²)	降伏点強度 (MPa)	引張強度 (MPa)
主筋	D19	287	525	720
	D16	199	392	591
補強筋	D10	127	330	482
	D6	32	333	486

デルとして、藤井らによるモデルを参考にした。⁹⁾ 尚、繰返し载荷によるコア領域内の付着劣化を考慮するために、本解析では、接合部コア内の付着強度を ($1/2 u$) で解析を行っている。

(4) 離散ひび割れ

本解析の離散ひび割れは、RC 造ト形柱梁接合部試験体の実験結果^{1)~4)}における最終ひび割れ状況をもとに、図 - 1 の点線で示すように離散ひび割れを仮定した。

図 - 5 に付着割裂要素モデルを示す。機械式定着法を用いたト形柱梁接合部の破壊性状で見られた柱外側フェイスの主筋に沿ったひび割れを本解析では、藤井モデルを参考に図 - 5 に示すように、バネ要素と界面要素を並列に組み合わせた。鉄筋とコンクリート界面の滑りは界面要素を用い、また、バネ要素は引張にのみ抵抗する要素で、鉄筋ふしによる割裂作用をバネ要素で表現した。^{9), 10)}、バネの圧縮剛性 (K_w) は次式により算定した。

$$K_w = (d + d/20) L E_c \cos^2 \theta / (d/20) \quad (6)$$

3. 解析結果

3.1 荷重 - 変形

図 - 6 に荷重 - 変形関係を示す。図中の実験結果と解析結果は、梁加力点の荷重と部材角の関係関係を示している。

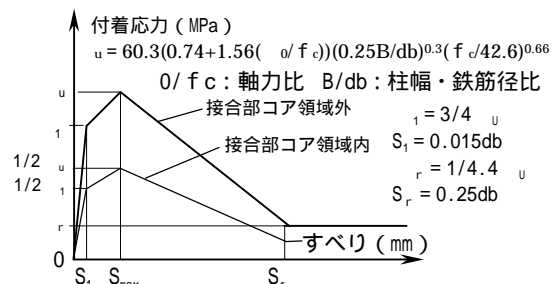


図 - 4 付着 - すべりモデル

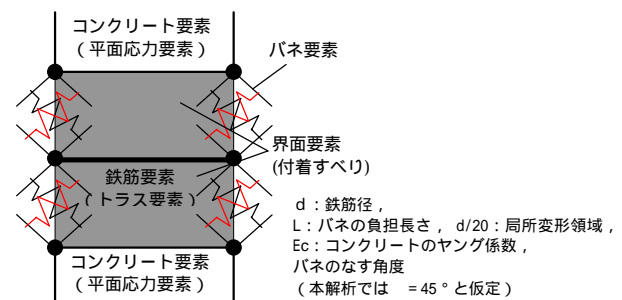


図 - 5 付着割裂要素モデル

(1) 梁曲げ降伏が先行するNタイプ

NUCS 試験体は、実験値の初期剛性及びその後の剛性を良好に評価している。一方、NMCS 試験体は、初期剛性は良い対応を示しているが、その後の剛性を高めに評価する傾向にある。

両試験体の解析の最大耐力は、実験値よりも高い値を示している。また、降伏後の解析結果は、実験結果と同様に耐力が徐々に増加し変形が進んでいることが分かる。

(2) 接合部せん断破壊するBタイプ

BUCS 試験体の最大耐力に至るまでの解析結果は、実験値とほぼ同等の値を示している。また、BMCS 試験体においても、初期剛性から最

大耐力に至るまで実験値と良い対応を示している。また、最大耐力後の解析結果は、BUCS 試験体は、最大耐力後の変形性能をほぼ忠実に再現しているのに対して、BMCS 試験体は、耐力低下が早く起こり過小評価している。

BMCS 試験体の定着部のモデル化は、コンクリートと定着板の界面をバネ要素を用いて離散化しており、バネ要素は弾塑性バネで、定着板の支圧力と滑りの関係において降伏値に到達すると、実際は徐々に剛性が低下するが、解析では剛性が零になるようにモデル化している。したがって、BMCS 試験体の解析結果は実験結果よりもやや早く耐力低下が起こっている。

3.2 破壊状況

図-7に実験の最終破壊状況図を示す。図-8に解析結果の部材角 1/50 時におけるひび割れ図を示す。解析によるひび割れは、分布ひび割れモデルを用いており、各要素の中心位置にひび割れた方向に線分で図示している。実験結果の破壊状況に対し、解析結果におけるひび割れ状況では、Nタイプは梁端部領域でひび割れが広く分布する傾向が見られる。一方、Bタイプは梁端部領域でNタイプより狭い領域でひび割れが分布している。したがって、実験のNタイプで顕著に見られた梁端部の曲げ破壊が解析結果の傾向と一致する。実験における接合部の対角方向のひび割れに関しては、全ての試験体の解析結果で接合部に斜めひび割れが分布し、ひび割れ方向が実験結果と一致している。次に、機械式定着とU字型定着のひび割れ状況を比較すると、BMCS 試験体は、柱外側主筋に沿ってひび割れが長く分布する傾向が見られる。これに対して BUCS 試験体では柱外側主筋に沿ったひび割れは分布するが BMCS ほど顕著ではない。

図-9に接合部近傍の最小主応力分布を示す。また、同図には、各試験体の正・負加力それぞれの最大主応力(圧縮)の値を示した。Nタイプでは圧縮側梁端部の狭い領域に圧縮応力が集中し、Bタイプでは接合部内で対角方向に広く圧縮応力が分布している。また、機械式定着とU

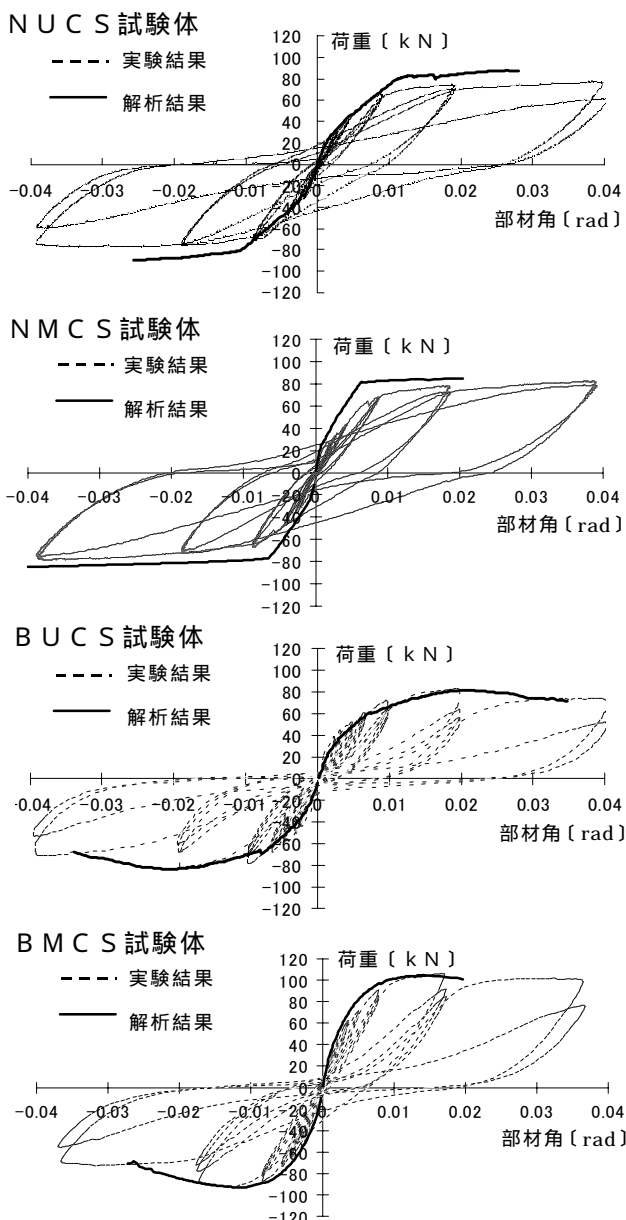


図-6 荷重 - 変形関係(実験結果と単調解析結果)

字型定着で主応力分布の比較をすると、BMCS試験体は圧縮応力が接合部内で対角方向に分布し、さらに引張側の梁主筋定着部近傍で、より大きな圧縮応力が働いている。一方、BUCS試験体は、接合部内では対角方向に圧縮応力が分布するのみで、定着部近傍の主応力の流れに

変化は見られない。したがって、これらのことから、定着法の違いにより、内部応力状態に差が生じることが分かる。

3.3 梁主筋のひずみ状況

図 - 10 に機械式及びU字型定着を用いた接合部内の梁主筋ひずみ測定位置と梁荷重の加力方

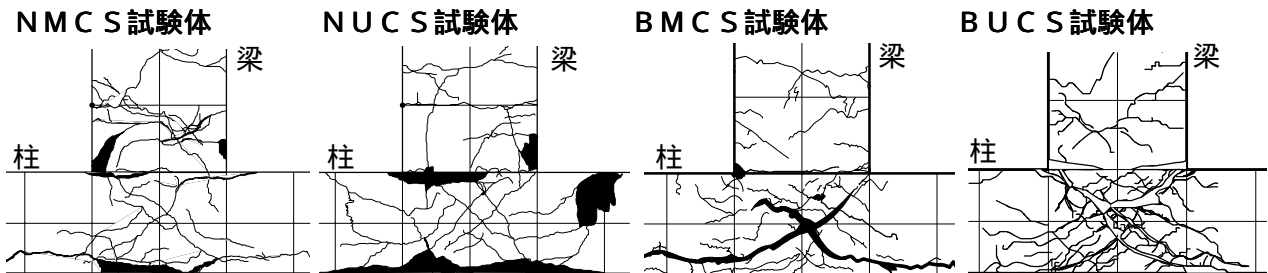


図 - 7 最終破壊状況 (実験結果)

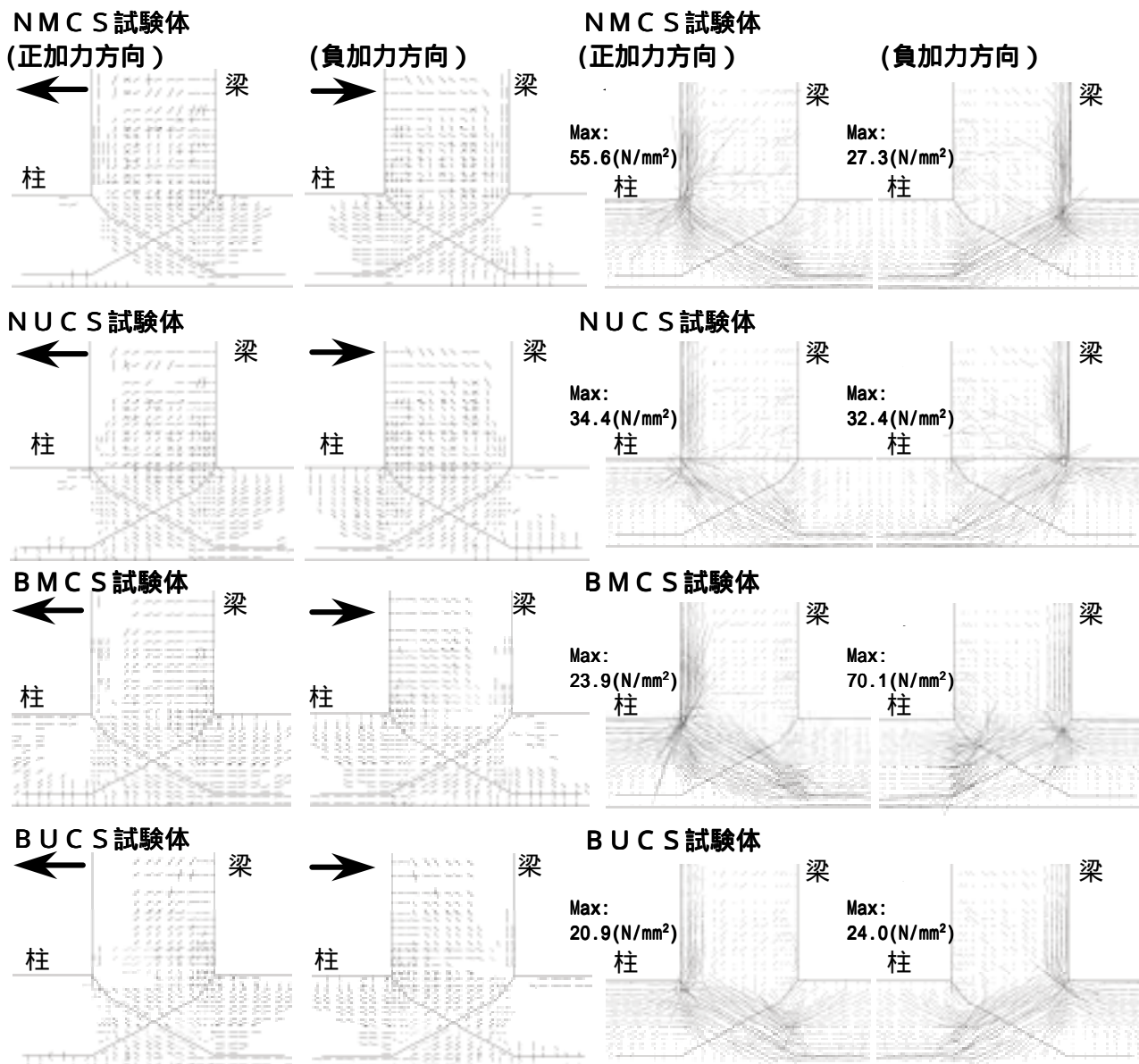


図 - 8 解析によるひび割れ図 (部材角 1/50 時における解析結果)

図 - 9 最小主応力分布図 (部材角 1/50 時における解析結果)

向を示し、図 - 11 に部材角 1/400, 1/200, 1/100 の梁主筋のひずみ分布を示す。

梁主筋降伏のひずみの目安を 2000 (μ) と仮定した上で部材角 1/100 時の引張側のひずみ量を N タイプと B タイプで比較すると、N タイプは、実験及び解析値ともに、梁端部付近で降伏ひずみを上回っている。B タイプでは、実験及び解析値ともに接合部内の梁主筋全域に渡って降伏ひずみを下回る結果が確認される。次に、定着法による違いを比較すると、U 字型定着では、定着の深い位置で大きなひずみが見られた。また、折曲げ定着部から梁端部にかけてひずみが一様に増加する傾向にあり、解析結果は実験

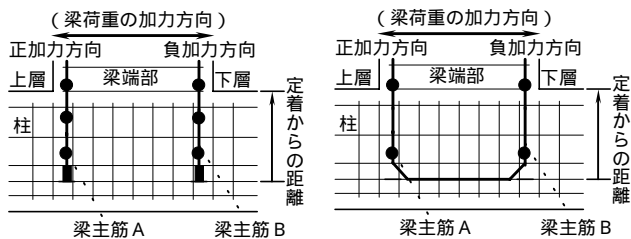
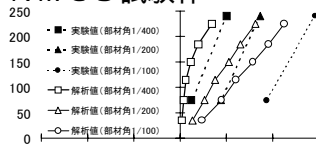


図 - 10 ひずみ測定位置

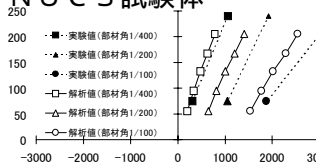
【正加力方向時】

梁主筋 B (引張側)

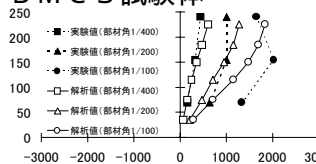
N M C S 試験体



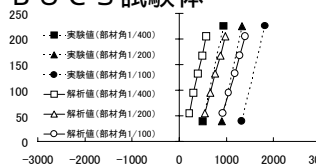
N U C S 試験体



B M C S 試験体



B U C S 試験体



【負加力方向時】

梁主筋 A (引張側)

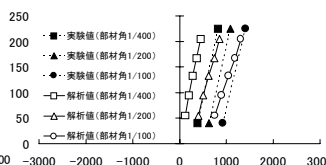
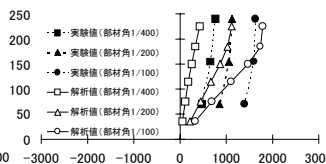
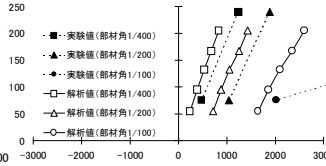
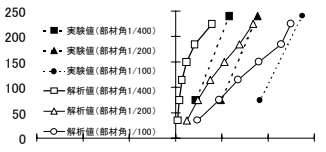


図 - 11 正負加力方向の梁主筋のひずみ分布

の傾向と比較的良好な対応を示した。一方、機械式定着では、定着部付近のひずみが実験値より小さくなり、定着部から梁端部に向かって、ひずみの増加量が急激に大きくなる傾向を示した。

4. まとめ

1. 解析結果の荷重 - 変形関係は、最大耐力及び最大耐力後の変形性状を良好に再現できた。
2. 解析によるひび割れ分布は、実験結果に対応した結果であった。
3. 梁主筋のひずみ分布は、U字型では実験と良く対応しているが、機械式では、定着部のひずみ量を過小評価した。
4. 機械式では、圧縮ストラットの形成とともに、梁主筋の定着部近傍で圧縮応力の集中が見られたのに対し、U字型では対角方向に圧縮応力が分布するのみであり応力状態に違いが見られた。

【謝辞】本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）研究課題「環境防災都市に関する研究」（研究代表者：理工学研究所長 大津岩夫，実行委員会委員長 石丸辰治）の一環として実施されたものである。関係者各位に感謝の意を表す。また、本研究あたり、日本大学理工学部建築学科教授、白井伸明先生に貴重な御助言を頂きました。深く感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 安達洋, 奥田明久ほか: 機械式定着法を用いた鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の動的な定着性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 18, No. 2, pp971 ~ 976, 1996
- 2) 安達洋, 増島克巳ほか: 鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の力学的性状に及ぼす載荷速度の影響に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 20, No. 3, pp553 ~ 558, 1998
- 3) 安達洋, 山田高史ほか: 変動軸力を受ける鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の力学的性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 21, No. 3, pp637 ~ 642, 1999
- 4) 安達洋, 小島陽一ほか: 変動軸力を受ける機械式定着法を用いた鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 24, No. 2, pp445 ~ 450, 2002
- 5) DIANA Foundation Expertise Center for Computational Mechanics: DIANA Finite Element Analysis User's Manual, TNO Building and Construction Research, 1999
- 6) Hikaru Nakarura and Takeshi Higai: COMPRESSIVE FRACTURE ENERGY AND FRACTURE ZONE LENGTH OF CONCRETE, MODELING OF IN ELASTIC BEHAVIOR OF RC STRUCTURES UNDER SEISMIC LOADS, ASCE, pp471 ~ 487, 1990. 10
- 7) 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.
- 8) 大岡, 橋高, 渡辺: コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入及び材齢の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 529 号, pp1-6, 2003.3
- 9) 藤井栄: 鉄筋コンクリートにおける付着定着特性とその部材に及ぼす影響に関する研究, 京都大学学位論文, 1992. 1
- 10) 白井伸明, 森泉和人ほか: RC 造柱・梁接合部の破壊モードに関する 2-D 及び 3-D 解析 (その 2) 単調および繰り返し解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp447 ~ 448, 2003.9