論文 RC 造 90。折曲げ鉄筋の定着破壊機構に関する 3 次元有限要素解析

菅原 章人^{*1}・後藤 康明^{*2}

要旨:RC造柱梁接合部内に 90°折曲げ定着された梁主筋の定着破壊性状について,3次元有限要素解析を行った。90°折曲げ定着に見られる側方割裂,掻き出し,局部支圧の異なる3種の定着破壊を起こした試験体を対象とし,各種の定着破壊形式を表現できる解析モデルを構築した。それぞれの破壊形式における破壊領域, 支圧応力度分布について比較を行い,破壊判別方法について検討した。

キーワード:鉄筋コンクリート,90°折曲げ定着,定着破壊,3次元非線形有限要素解析

1. はじめに

RC 造柱梁接合部において,梁主筋を通し配筋できな い外柱では 90°折曲げ定着を行うのが一般的である。折 曲げ定着破壊形式は 3種(側方割裂破壊・局部支圧破壊・ 掻き出し破壊)¹⁾に分類でき,側方割裂破壊に関しては 過去に 2次元有限要素解析などにより研究されている²⁾。 3次元有限要素解析では,石岡ら¹⁾により分布ひび割れ モデルを用いて掻き出し破壊に結びつく破壊面位置を 推定できる可能性を示している。また,山本ら³⁾はひび 割れ発生箇所の違いから側方割裂破壊と局部支圧破壊 の判別ができることを示している。本研究では 3次元有 限要素解析を用い,90°折曲げ定着の全ての破壊形式の判 別法について検討した。

2. 局部支圧破壊試験体

2.1 解析対象試験体 [U38-24]

試験体は,局部支圧破壊を予定し小径折曲げしたU字 形梁主筋のみを柱型に埋め込み,梁コンクリートを省略 している。図-1に示すように柱型の両側に柱梁接合部 に相当する試験部分を設け,個別に加力した。梁せいを 800mm と想定し,梁上端筋と下端筋の主筋間距離を 660mm,柱型長さ2200mm,柱断面400×750mm,梁筋水 平定着長さ600mmとしている。圧縮反力位置は梁せい 800mmとし終局時の圧縮域を0.2Dと仮定して定めた。 梁主筋は内法半径を1.5d(d:梁主筋径)でU字形に折 曲げて柱内に定着している。折曲げ位置での定着耐力を 検討するため梁主筋水平定着部にシース管をかぶせて コンクリートとの付着を完全に無くしている。材料諸元 を表-1に示す。

2.2 解析手法

解析にはオランダ TNO で開発された汎用 3 次元線形 有限要素解析プログラム DIANAver.9.1 を用いた。解析モ デルでは対称性を考慮して断面の 1/2 をモデル化した。

*1 株式会社大林組 工修 (正会員)

*2 北海道大学大学院教授 工学研究科空間性能システム専攻 工博 (正会員)

図 - 2 に要素分割図を示す。コンクリートは 8 節点直方 体要素及び6節点三角柱要素を用い,梁主筋には6節点 三角柱要素を用いた。柱主筋と横補強筋は完全付着の線 材トラス要素を用いた。梁主筋とコンクリート間の付着 はインターフェイス要素を用いて表現した。加力は梁引 張筋端部(柱面)に鉛直上向きに強制変位を与えた。

2.3 構成則

(1)コンクリート

圧縮側の上昇域は Saenz 式⁴⁾を用い,下降域には Nakamura ら⁵⁾の圧縮破壊エネルギーG_{fc}から定義した直 線モデルを用いた。破壊基準には Drucker-Prager⁶⁾の基準



図 - 1 解析対象実験試験体(U38-24)

表 - 1 材料諸元

試験体名		U3		
コンク リート	ヤング係数	圧縮強度	強度時歪	引張強度
	E _c (GPa)	σ _B (MPa)	$\epsilon_{c}(\mu)$	σ _t (MPa)
	31.2	30.7	2692	2.36
	看別	降伏強度	降伏歪	ヤング係数
姓笛	種別	降伏強度 σ _y (MPa)	降伏歪 ε _y (μ)	ヤング係数 E _s (GPa)
鉄筋	種別 D38(SD685)	降伏強度 σ _y (MPa) 515	降伏歪 ε _y (μ) 4768	ヤング係数 E _s (GPa) 186



断伝達は伝達係数 β=0.05 で一定とした。図 - 3(a)に一軸 応力—歪関係を示す。

(2)鉄筋

降伏条件は von Mises の条件⁶⁾を適用し,応力—歪関係 は降伏点が不明瞭であった梁主筋については multi-linear 型で表現し,柱主筋及び横補強筋は歪硬化を考慮した bi-linearで表現した。図-3(b)(c)に応力—歪関係を示す。

(3)付着

インターフェイス要素は鉄筋軸方向と直交方向に独 立したバネを用いて表現しているので,付着特性を個々 に与える。図-3(d)に鉄筋軸方向の付着構成則を示す。 石岡らの研究¹⁾で付着強度を直交方向に作用する支圧力 の影響を考慮して増大させ,その増大には上限を設ける 必要性があることを論じているため,本解析でも支圧力 の影響を考慮して付着強度を決定する。

基準とした付着強度 τ_{max}=3.92MPa は和泉ら²⁾が提案したもので,支圧力が0における付着強度とした。この付着強度はコンクリート強度が27MPa を基準としているが,本解析モデルではそれ程差がないためコンクリート強度による補正を行っていない。支圧力と付着強度の関係をモール・クーロン式から式(1)で仮定できる。

$\tau_{\max} = \sigma \cdot \tan \phi$	+ 3.92	(1)
_{max} :付着強度	:支圧力	
:内部摩擦角(=10°)	

また,角ら⁷⁾の研究を参考にして支圧力が $0.3\sigma_B$ を超え ると付着強度が頭打ちになるように上限を設けた。図-4 に支圧力—付着強度関係の仮定を示す。まず梁主筋軸 方向の付着強度を $\tau_{max}=3.92$ MPaとした解析モデル(以下, 基準モデル)で一度解析を行い,その解析結果から梁主筋 周りのインターフェイス要素の支圧力を求めた。本来で あれば各々のインターフェイス要素に図-4 に従った τ_{max} を設定するのが好ましいが,モデルを構築する上で 効率的ではない。本解析では便宜的に定着部を5区間に 分け,更に折曲げ内側と外側の計 10 区間とし,基準モ デル最大耐力時における各部位の支圧力平均値から τ_{max}



を算出して固定的に与え,支圧力を考慮して再解析を行った。水平定着部に関しては支圧力の影響に関わらず無 付着としている。表-2に各部の最大付着強度を示す。

鉄筋軸に直交方向の付着構成則を図 - 3(e)に示す。肌 離れ方向の剛性は 10⁻⁵N/mm³で一定とした。一方,支圧 方向は,要素モデルを用いた検討の結果,インターフェ イス要素の剛性が周りの材料の 1000 倍程度の大きな剛 性が必要で,支圧力に対し変形するコンクリートの剛性 が関係することから,付着剛性を式(2)で評価した。

$$K_{\nu} = \frac{E_c'}{l_c} \times 10^3 \tag{2}$$

K_v:支圧方向の付着剛性

l_c:支圧力を最も大きく受けるコンクリート要素寸法 E'_c:コンクリート圧縮強度時接線剛性

K_vの値を変化させて検討した結果,荷重変形関係におい て初期剛性に与える影響はそれ程ないのに対し, K_vの 値が大きくなると耐力も大きくなる傾向がみられた。よ って本解析ではK_vが下限値となるE'。を用いて評価した。 2.4 解析結果及び考察

2.4.1 荷重变形関係

図 - 5 に梁筋荷重—梁筋抜出し量関係を示す。梁筋荷 重は梁主筋に加えた荷重を,梁筋抜出し量は柱心軸に対 する梁主筋折曲げ始点の相対抜出し量である。初期剛性



表 - 2 最大付着強度

は概ね一致し,変位3mm程までは実験値を精度よく捉えている。その後は実験値同様耐力は横ばいになり,変位7.54mmで発散した。

2.4.2 コンクリート破壊領域

図-6 に最大耐力時ひび割れ歪ベクトル図を示す。ベ クトルは積分点位置に表示され,線の長さはひび割れ幅 の大きさに対応する。ひび割れは図中の線に直交して発 生していることを示している。主に梁主筋沿いや加力側 折曲げ部と圧縮反力を結ぶ圧縮ストラット域と全体的 にわたってひび割れが生じている。しかし定着破壊を示 すひび割れはこれからは判断できない。コンクリートの 圧壊の定義は早瀬ら⁸⁾の研究から,解析結果から得られ た最小主歪
ε
,がコンクリートの材料結果から得られたー 軸圧縮強度時 ε ε を超えた時とする。図-7に最大耐力 時の最小主歪(ɛ3)分布図を示す。A層では加力側折曲げ部 の広範囲にわたって放射状にコンクリートが圧壊して いる。柱幅方向ではC層の折曲げ部外側の一部までコン クリートの圧壊領域を確認することができる。C 層より 外側の層では圧縮圧壊が生じておらず,本試験体の破壊 が局部支圧破壊によるものと判断できる。

3. 側方割裂破壊試験体

3.1 解析対象試験体 [JA-1-2]

対象試験体は,柱型にL字型に折曲げ加工した梁主筋 を埋込んだ試験体で,寸法は約1/2に縮小している。図 -8に示すように梁型コンクリートを省略し柱型に2つ の試験部を有している。定着部の耐力と応力性状を明確 にするために,水平定着部は塩ビパイプにて無付着とし ている。4本ある梁主筋のうち両外側の2本のみを同時 に引抜加力したものである。材料諸元を表-3に示す。 3.2 解析手法

解析手法は U38-24 と同様で,解析モデルは対称性を



考慮して試験体の 1/2 をモデル化した。図 - 9 に要素分 割図を示す。



強度コンクリートを用いているため付着強度に与える 影響が大きいと考えられ,基準付着強度 τ_{max}をコンクリ ート強度の平方根で補正して,τ_{max}=5.74MPa とした。表 -4に支圧力の違いによる各部の最大付着強度を示す。 3.4 解析結果及び考察

3.4.1 荷重変形関係

図 - 10 に梁筋荷重—梁筋抜出し量関係を示す。梁筋荷 重はそれぞれの梁主筋荷重値としている。初期剛性は概 ねー致しているが,初期剛性低下が実験値に比べ大きく なっている。これは梁主筋全長に渡って付着強度に達し, 低下した影響が解析では大きくでたのだと考えられる。 その後の剛性低下は実験をよく再現できていて,変位 0.89mm で発散した。発散時には耐力はほぼ頭打ちにな っているので,ここでは発散時を最大耐力と定義する。 3.4.2 コンクリート破壊領域

図 - 11 に最大耐力時ひび割れ歪ベクトル図を示す。実 験時と同様に,折曲げ部近傍のかぶりコンクリートにひ び割れが集中して生じている。図 - 12 に最大耐力時の最 小主歪(ɛ₃)分布図を示す。解析結果から得られた最小主歪 ɛ₃がコンクリートの材料結果から得られた一軸圧縮強度 時歪 ɛ_cを超えた時を圧壊と定義する。圧壊しているコン クリートはA層で確認できるように梁主筋直上で折曲げ

表-3 材料諸元

試験体名 JA1-2					
コンク リート	ヤング係数	圧縮強度	強度時歪	引張強度	
	E _c (GPa)	σ _B (MPa)	$\epsilon_{c}(\mu)$	$\sigma_t(MPa)$	
	38.6	57.8	2452	4.00	
鉄筋	看別	降伏強度	降伏歪	ヤング係数	
	15,00	σ _y (MPa)	$\epsilon_{y}(\mu)$	E _s (GPa)	
	D19(SD685)	722	3653	207	
	D16(SD590)	599	4492	184	
	6φ(SR735)	743	5138	180	

モデルタ	郭습	付着強度 _{tmax} (MPa)			
	꼬여	直線部	折曲げ部	余長部	
14.1.2	内側	No bond	8.80	6.80	
JA-1-2	外側	No bond	8.80	5.92	



内側部分と, B 層のわずか一部だけであった。この2層 以外のコンクリートでは圧壊が生じていないため, U38-24 モデルと圧壊の領域に大きな違いが出ている。図 - 13 に折曲げ部内側にあるインターフェイス要素の支 圧応力度—梁筋抜出し量関係を示す。抜出し量 0.4mm 程 までは同様の支圧応力度で推移しているが,それ以降で は側面側と柱心側の要素で支圧応力度の大きさや最大 になる位置に違いが生じている。これは図 - 11 に示す折 曲げ部近傍のコンクリートのひび割れが側方割裂破壊 につながり,側面側のコンクリートが破壊されて支圧応 力が頭打ちになったためと考えられる。

4. 掻き出し破壊試験体

4.1 解析対象試験体 [LA1-1]

対象試験体は、図 - 14 に示すように柱型にL 字型に折 曲げ加工した梁主筋を埋め込んだ試験体で、寸法は約 1/2 に縮小していて、梁型コンクリートを省略している。加 力は上下柱のせん断力が同一となるように P2/P1=0.211 とした静的一方向載荷である。4 本ある梁主筋を加力方 向に平行移動する加力冶具で結び、4 本同時に加力する ように冶具に引張力を与えたものである。材料諸元を表 -5 に示す。

4.2 解析手法

解析手法は U38-24 と同様で,解析モデルは対称性を 考慮して試験体の 1/2 をモデル化した。実験では上下柱 のせん断力が同一となるように上柱に一定割合の荷重 を与えているが,解析では鉛直方向に支持しただけであ る。図 - 15 に要素分割図を示す。

4.3 構成則

コンクリートと付着材料モデルは U38-24 と,鉄筋モ デルは JA1-2 モデルと同様である。表 - 6 に支圧力の違 いによる各部の最大付着強度を示す。

4.4 解析結果及び考察

4.4.1 荷重变形関係

図 - 16 に梁筋荷重—梁筋抜出し量関係を示す。梁筋荷





初期剛性は完全に一致しているが,初期剛性低下以降実 験値よりも耐力が高くなっている。変位 0.46mm で一度 耐力は頭打ちになったが再び耐力が上昇して,変位 1.21mm で発散した。

4.4.2 コンクリート破壊領域

図 - 17 に梁筋荷重—横補強筋力関係を示す。歪計測位 置は実験,解析共に柱心軸付近としている。実験時には No.3 と No.4 の補強筋が降伏することで耐力が決定して いる。一方解析では No.4 の補強筋の降伏で一時的に耐力 が頭打ちになっているが,再び耐力が上昇している。こ れは今回のモデルではひび割れを分散ひび割れでモデ ル化しているため,掻き出し破壊面におけるコンクリー トの完全分断が表現できずに折曲げ部の支圧力による 抵抗が継続的に維持されたためと考えられる。よって, このモデルでは No.4 の補強筋が降伏した時点までを考 察の対象とし,それ以降の範囲については議論しない。 図 - 18 に No.4 の補強筋降伏時のひび割れ歪ベクトル図 を示す。実験時と同様に,梁主筋沿いに直線部から余長 部へと向かうひび割れと,このひび割れが圧縮反力点へ と向かう斜めひび割れ,また折曲げ部起点から折曲げと

表-5 材料諸元

試験体名 LA1-1						
コンク リート	ヤング係数	圧縮強度	強度時歪	引張強度		
	E _c (GPa)	$E_c(GPa) = \sigma_B(MPa)$		$\sigma_t(MPa)$		
	31.3	30.9	2753	2.6		
鉄筋	括则	降伏強度	降伏歪	ヤング係数		
	11年 万丁	σ _y (MPa)	$\epsilon_y(\mu)$	E _s (GPa)		
	D19(SD685)	724	3710	207		
	D16(SD345)	374	2360	170		

表 - 6 最大付着強度

モデル名	主筋位置	郭습	付着強度 $\tau_{max}(MPa)$		
		피미	直線部	折曲げ部	余長部
LA1-1	柱心側	内側	4.06	5.55	4.15
		外側	4.05	5.55	4.17
	側面側	内側	4.00	3.94	4.01
		外側	3.99	3.97	4.00



逆方向の柱側に向かうひび割れが生じた。実験ではこの ひび割れが掻き出し破壊特有の破壊面となり大きく拡 幅したが,解析では前述したコンクリートの分離の状況 を正しく表現できていないことが,実験値よりも耐力が 大きくなった要因といえる。解析結果から得られた最小 主歪 ٤,3 がコンクリートの材料結果から得られた一軸圧縮 強度時歪 ٤,2 を超えた時を圧壊と定義すると,図-19 に 示すように折曲げ内側のコンクリートを見ても圧壊を 生じている箇所はみあたらず,3 種の定着破壊領域に違 いがみられる。

5. まとめ

RC 造 90°折曲げ鉄筋の定着破壊機構に関する 3 次元 有限要素解析を行い,以下の知見を得た。

- コンクリートと鉄筋間の付着挙動をインターフェ イス要素を用いて支圧応力度の影響を考慮するこ とで定着破壊挙動を再現できた。
- コンクリートの破壊領域の違いを考察し、3種の定着破壊を判別できることを示した。しかし、離散系の破壊となる掻き出し破壊については、十分に再現できたとは言えない。

謝辞:本研究は,平成 19 年度東京工業大学建築物理センター共同利用研究として行った。

参考文献

- 石岡拓ほか: 掻き出し破壊を伴う折曲げ筋定着性状の3次元非線形有限要素解析,コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.811-816, 2001
- 2) 和泉信之ほか: RC 壁柱・はり接合部におけるはり
 主筋の折曲げ定着機構に関する研究日本建築学会
 構造系論文報告集,第462号,pp.121-130,1994.8
- 山本ほか: RC 造 90°折曲げ定着における折曲げ近 傍の応力性状に関する 3 次元 FEM 解析, コンクリ ート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.685-690, 2006
- Saenz,L.P et al.: Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete, J.Am.Concr.Inst., Vol.61, pp.1229-1235, 1964.9
- H.Nakamura et al.: Compressive fracture energy and fracture zone length of Concrete, seminar on Post-peak behavior of RC structures subjected to seismic loads, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, 1999
- TNO DIANA: DIANA-9 User's Manual Material Library, 2005.4
- 7) 角ほか:横方向応力作用下における異形鉄筋の付着 強度に関する研究,土木学会論文集,No.451,V-17, pp.225-234,1992.8
- P瀬ほか:コンクリート部材中に発生する局部支圧 破壊機構に関する3次元有限要素解析,コンクリー ト工学年次論文集,Vol.29,No.3,pp.1387-1392,2007