

[2034] U型はり主筋の定着機構のFEM解析

宮下 丘*¹ 別所 佐登志*² 加藤 友康*³ 張 愛暉*²

1. はじめに

超高層RC造建物の外柱はり骨組のはり主筋を接合部内で定着する場合を想定し、高強度太径鉄筋D41 (SD490)と高強度コンクリート (Fc600kgf/cm²)を組み合わせた場合におけるはり主筋の接合部からの引抜実験^[1]を対象にして、二次元FEMを用いて実験の解析を試みたものである。

解析の目的は定着耐力を求めることに有り、一連の8体の試験体を解析し、はり主筋のひずみ分布、付着の弾塑性状況および主筋折り曲げ部近傍のコンクリートの圧縮応力等を求め、検討した結果を報告するものである。

2. 解析の諸条件

2.1 解析対象モデル

解析は筆者等が実施した高強度太径鉄筋の定着実験^[1](図-1参照)のうち、高強度コンクリートを用いた8体を行う。表-1に解析対象試験体の一覧を示す。定着破壊はNo.3、No.5、No.6の3体で生じ、他は主筋のひずみが増大し、加力を止めたものである。

2.2 解析法

解析^[2]は平面応力問題とし、コンクリート要素、鉄筋要素および両者を結ぶ付着要素より成っており、各々の要素に非線形を考慮し、荷重増分法にて行う。コンクリートの降伏条件はDrucker-Prager式を用い、ひび割れ発生後のせん断剛性は弾性時の1割としている。定着破壊の条件は付着のすべり破壊以外は解析に組み入れていないため、実験の最大荷重時まで解析を進める。

2.3 解析モデル

解析モデルを図-2に示す。コンクリート要素およびはり主筋を4辺形要素とし、両者の対応する節点を付着要素で結びつける。はり主筋と同じ位置にあるコンクリート要素は鉄筋の有効厚さを引いた厚さを有するものとする。柱主筋は線材とし、せん断補強筋も線材とし、直接コンクリートと剛結する。

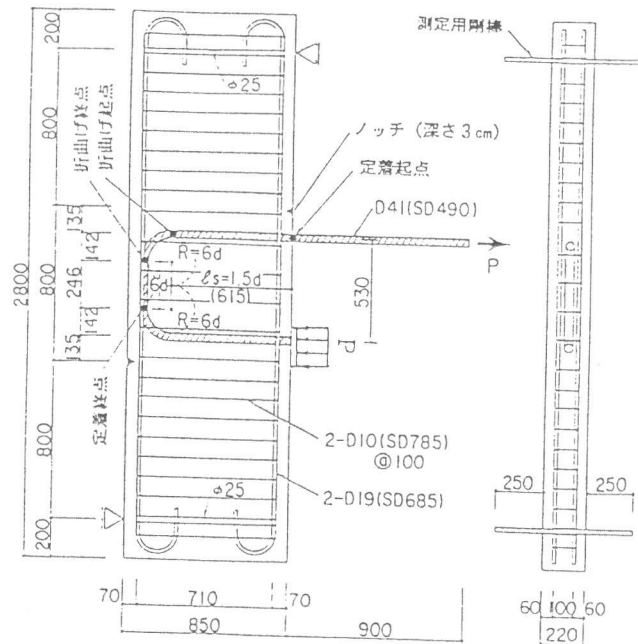


図-1 試験体概要 (No.1モデル)

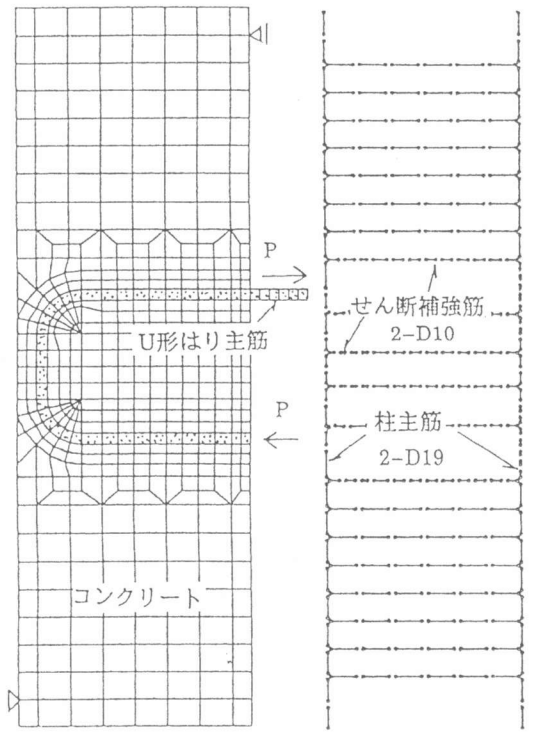
表-1 解析対象試験体

解析モデル	試験体名	折り曲げ直径 R	埋め込み直線部長さ l _s *	水平投影長さ l _{ah}	余長 l _E	定着型式
No.1	U60-R6-15	6d	15d	779	6d	U
No.2	U60-R6-10		10d	574		
No.3	U60-R6-0		(15d)	779		
No.4	U60-R3-15	3d	15d	718		
No.5	U60-R3-10		10d	513		
No.6	U60-R3-0		(15d)	718		
No.7	L60-R6-15A	6d	15d	779	6d	L
No.8	L60-R6-15B				12d	

(*括号がある場合は直線部付着を切ったモデル)

*1鹿島 情報システム部 (正会員) *2鹿島 技術研究所 (正会員)

*3鹿島 技術研究所



(コンクリート U型主筋) (柱主筋 せん断補強筋)

図-2 解析モデル

2. 4 材料特性

コンクリートの材料特性は材料試験の結果より図-3に示す σ - ϵ 関係を用いる。鉄筋は全てバイリニアールとし、はり主筋は 5.37tf/cm^2 、柱主筋は 7.21tf/cm^2 、せん断補強筋は 8.45tf/cm^2 の降伏応力を用い、降伏後の剛性は弾性時 (2100tf/cm^2) の1%とする。

付着の特性は既往研究^[3]を参考に、はり主筋の折り曲り部には圧縮力による摩擦効果が働くため、直線部と折り曲げ部と異なる値を採用する。折り曲り部は付着応力がある値に達すると滑り出すという、付着応力(τ)-すべり量(S)の関係を仮定し、直線部の τ - S 関係にこの τ - S 関係を重ね合わせて決める。具体的にはNo.1モデルの解析を行い、はり主筋のひずみ分布を実験値と比較することにより図-4に示すような値に決めた。鉄筋材軸と直交方向の付着バネは弾性とし、直線部は 10tf/cm^3 、折り曲げ部内側の圧縮力の働く部分ははり主筋とコンクリートが一体に変位するように 1000tf/cm^3 というある程度硬いバネを用いる。又、折り曲げ部でコンクリートと主筋間に引張力の働く部分の材軸直交方向のバネは無いものとする。(図-5参照)

3. 解析結果

3. 1 はり主筋のひずみ分布

代表的4体のはり主筋のひずみ分布を図-6に示す。No.1モデルは最大荷重時まで実験値と解析値は良好な一致を示す。No.2は 52tf ~ 72tf まで折り曲げ部より先の余長部の主筋ひずみが実験値より小さい値を示すが、最大荷重時では良好な一致を示す。No.4とNo.5も最大荷重時まで実験値と解析値はおおむね良好な一致を示す。

このように主筋のひずみ分布はいずれのモデルでも解析値と実験値は一致しており、折り曲げ部の付着の取り扱いおよび仮定した付着の応力とすべり量の関係も妥当なものと判断される。

3. 2 定着主筋の付着状況

代表的6体の最終荷重でのはり主筋まわりの付着の弾塑性状況を図-7に示す。No.1モデルは外力

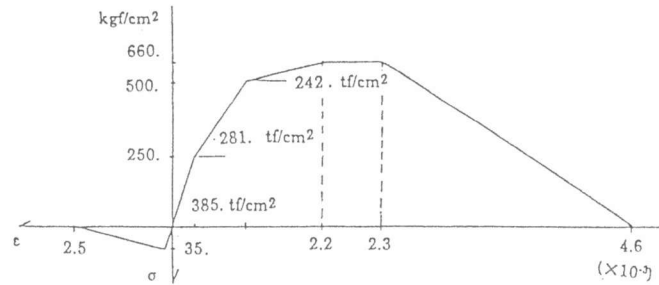


図-3 高強度コンクリートの σ - ϵ 関係

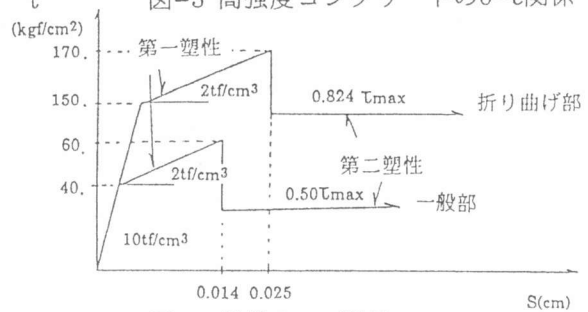


図-4 付着の τ - s 関係

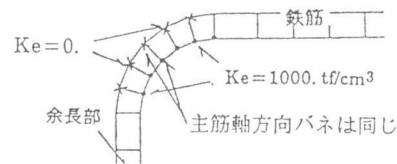


図-5 主筋折り曲げ部の付着要素詳細

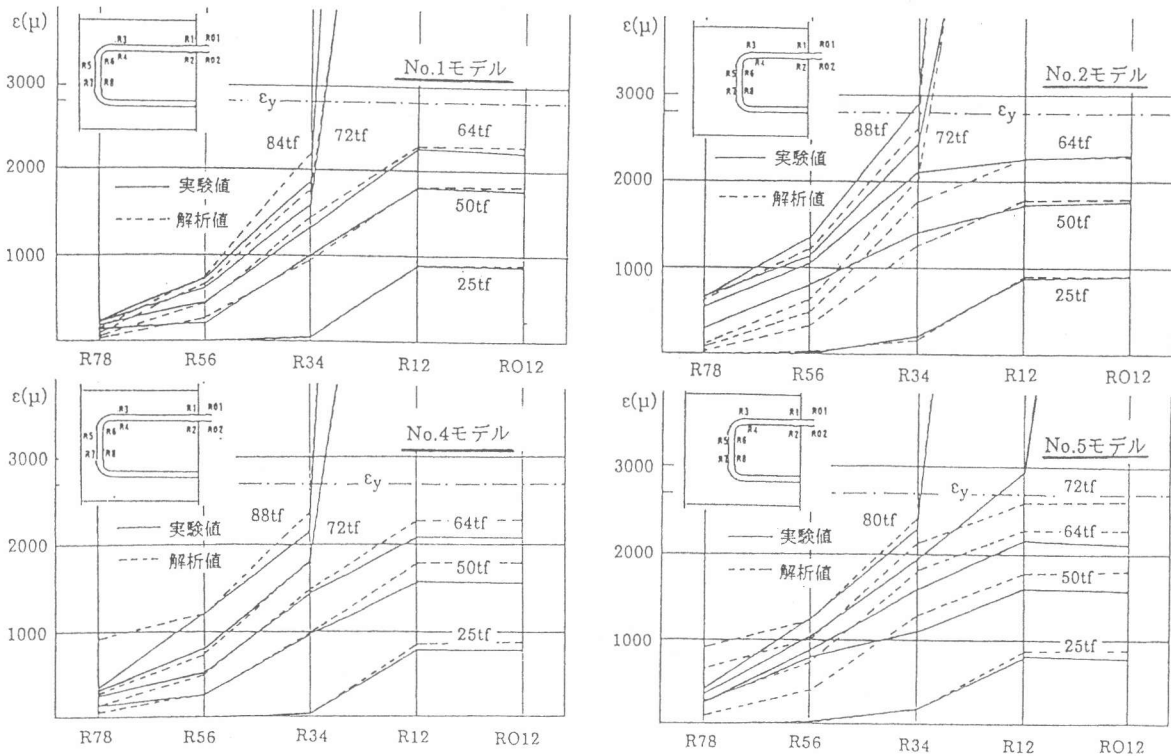


図-6 はり主筋のひずみ分布

が50tfで主筋の直線部が付着の第二塑性に入るが、最大荷重時(85tf)でも折り曲げ部全域は第二塑性に入っておらず、付着耐力に達していない。No.2とNo.4は最大荷重時でも下部折り曲げ部はほぼ弾性域である。No.3とNo.6は直線部の付着を切ったモデルであるが、各々の最大荷重でも付着破壊には到らなかった。No.7は86tfで全域第二塑性域に入り、実験の最大荷重89tfより少し低い荷重で付着破壊が認められた。

解析ではNo.7モデルのみが付着破壊を起こしたが、他は全て付着破壊に到らなかった。

3.3 応力分布

代表的4体のモデルのDrucker-Pragerの降伏条件式の応力値を黒の濃淡で表示し、図-8に示す。ただし二次元解析のため、はり主筋折り曲げ部近傍のコンクリートの応力値は厚さ方向の平均的な値を示している。これによると接合部の高応力の発生場所は主筋折り曲げ部と圧縮外力が働く線上に有り、高応力域の幅は4体ともあまり変わらない。又、柱脚部に高応力域が発生しているがこれは載荷条件によるものである。No.2とNo.4のモデルでは下部主筋折り曲げ部の外側にも高応力が発生している。

3.4 コンクリートの応力

表-2にはり主筋折り曲げ部に接する位置のコンクリートの最大圧縮応力(σ_0)を示す。この応力(σ_0)に接合部の厚さを乗じ、主筋の直径で除して求めた最大圧縮応力(σ_{max})、即ち解析で求めた支圧応力と参考として簡便な方法で求める支圧応力(σ_b)^[4]を併せて示す。支圧応力(σ_b)

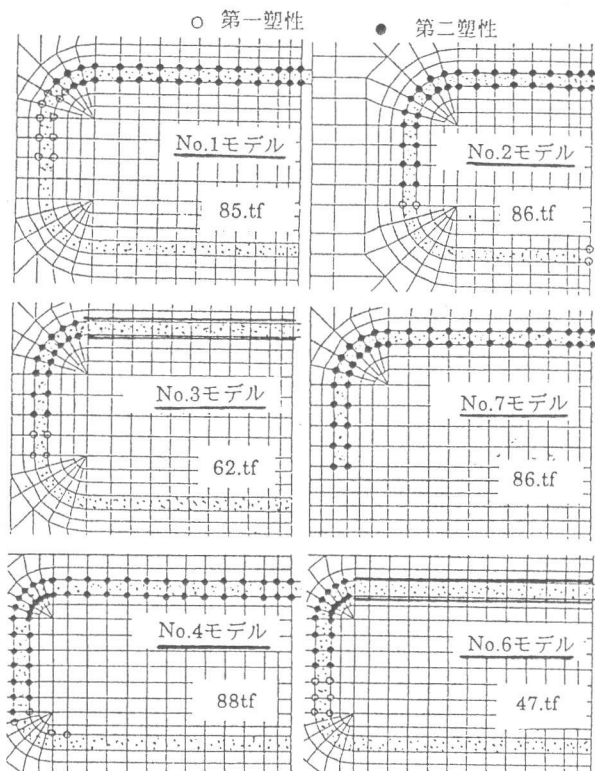


図-7 付着の弾塑性状況

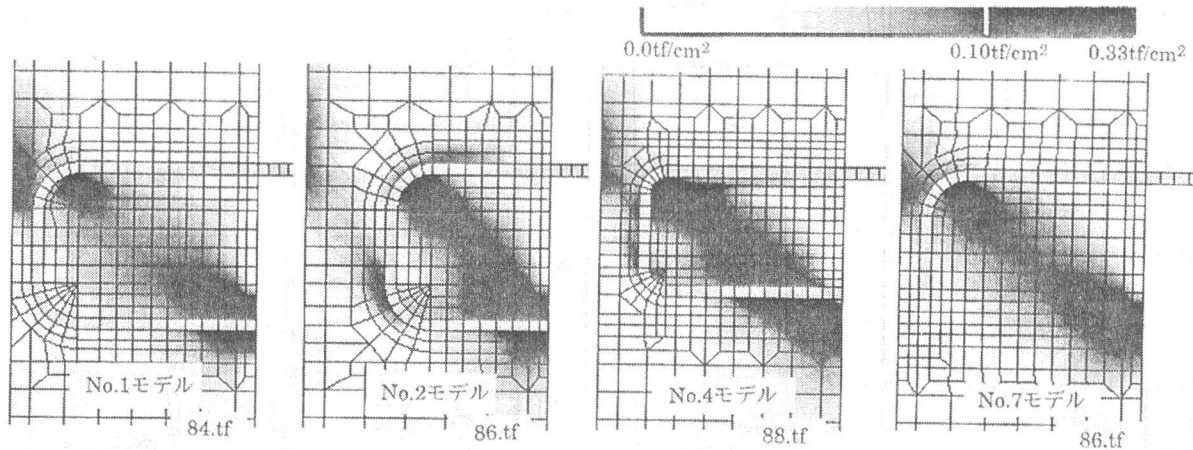


図-8 コンクリートの応力分布

は解析で求めた主筋の折り曲げ起点に働く鉄筋の力を、折り曲げ半径と主筋の直径で除して求める。又、接合部の健全性を検討するため接合部中央の最大圧縮応力(σ_p)を示す。

表-2より次のことが明らかになる。

- (1)主筋の折り曲げ半径が小さくなると、その比につれてコンクリートの圧縮応力が大きくなる。
- (2)定着破壊時の折り曲げ部近傍のコンクリート応力はNo.3で約1.2tf/cm²、No.5で約2.2tf/cm²、No.6で約1.7tf/cm²である。埋め込み長さの十分なモデルで折り曲げ半径の3倍のモデルでは1.1tf/cm²、1.5倍のモデルでは2.4tf/cm²でも定着破壊に到らなかった。
- (3)最大圧縮応力(σ_{max})と支圧応力(σ_b)は全モデルともほぼ同じ値で、支圧応力の方が幾分大きい。
- (4)接合部の応力は主筋折り曲げ半径の小さい方が幾分大きく、最も大きい値でも106kgf/cm²で斜めひび割れが発生しているが、せん断耐力には到っていないと判断できる。

4. まとめ

既往のはり主筋の定着実験のFEM解析を試み、主筋のひずみ分布は最大荷重までほぼ全域にわたって解析で求めることができた。又、主筋折り曲げ部近傍や接合部のコンクリートの圧縮応力値を示したが、残念ながら代表的試験体が定着破壊してないため、支圧強度については今回言及できなかった。支圧強度は主筋の埋め込み長さのみならず、接合部の厚さや補強筋の量等に影響を受けるため、今後も定着実験の解析を試み、定着耐力を明らかにしたい。

表-2 主筋折り曲げ部および接合部のコンクリートの最大圧縮応力

参考文献

- [1] 張、加藤、別所「高強度太径鉄筋を用いたはり主筋定着法に関する実験研究」コンクリート工学年次論文報告集Vol.15、No.2 PP.147-152 1993.6
- [2] 宮下、速水「RC非線形解析プログラム」破壊力学の応用研究委員会報告書 日本コンクリート工学協会 1993年10月 PP.438
- [3] 和泉、浜田、谷地敏、根本「はり下端筋が折曲げ定着されたRC壁柱、はり接合部に関する解析的研究」コンクリート工学年次論文報告集Vol.14、No.2 PP.413-418 1992.6
- [4] 藤井、森田、川上、山田「90. 折り曲げ鉄筋の定着耐力の再評価」建築学会構造系論文報告集 第429号 PP65-75 1991年11月

解析モデル	実験の破壊モード	最大荷重		主筋直線部の付着力* [Pb] (tf)	主筋折り曲げ部近傍のコンクリート応力			接合部の応力* [σ_p] (kgf/cm ²)
		実験 [Pe] (tf)	解析 [Pa] (tf)		圧縮応力* [σ_0] (kgf/cm ²)	最大圧縮応力* [σ_{max}] (tf/cm ²)	支圧応力** [σ_b] (tf/cm ²)	
No.1	RU	85.1	85.0	23.8	205.	1.10	1.21	80.
No.2	RU	85.5	86.0	15.8	241.	1.29	1.39	99.
No.3	BF	62.1	62.0	0.0	220.	1.18	1.23	65.
No.4	RU	88.0	88.0	23.8	443.	2.38	2.55	96.
No.5	BF	79.7	80.0	15.8	412.	2.21	2.55	106.
No.6	BF	47.3	47.0	0.0	308.	1.65	1.86	45.
No.7	RU	89.2	86.0	23.8	219.	1.18	1.23	83.
No.8	RU	89.2	89.0	23.8	228.	1.22	1.29	91.

RU:定着主筋降伏耐力の1.1倍以上かつ、ひずみが25000 μ まで確認

BF:付着定着破壊

*解析で求めた値

**支圧応力: $\sigma_b = (Pa - Pb) / (r \times D)$ で求めた値 r=折り曲げ半径、D=主筋の長径