主筋の付着除去を施したヒンジ位置保証型 RC 梁の有限要素解析

FINITE ELEMENT ANALYSIS OF RC BEAM WITH A GUARANTEED HINGE POSITION HAVING DE-BONDING OF LONGITUDINAL REBARS

毎田悠承 — * 1 佐藤裕貴 — * 2
益田一毅 — * 2 坂田弘安 — * 3
前川利雄 — * 4 服部 翼 — * 4

Yusuke MAIDA — * 1 Yuki SATO — * 2
Kazuki MASUDA — * 2 Hiroyasu SAKATA — * 3
Toshio MAEGAWA — * 4 Tsubasa HATTORI — * 4

キーワード：
ヒンジ位置保証型 RC 梁, ヒンジリロケーション, 損傷制御,
付着除去

Keywords:
RC beam with a guaranteed hinge position, Hinge relocation,
Damage control, De-bond

Finite element analysis was performed to replicate the test conditions of a reinforced concrete beam with a guaranteed hinge position having de-bonding of longitudinal rebars. From the analysis, it was found that the existence or nonexistence of longitudinal rebar bonding in the section from the beam end to the assumed hinge position did not affect the shear force-member drift ratio relationship or the damage conditions. In addition, the crack range could be suppressed with almost no decrease in stiffness through de-bonding of only the longitudinal rebars at the four corners instead of all the first layer rebars.

1. 序

建築物の地震後継続使用性, 財産保持性の観点から, 鉄筋コンクリート (以下, RC) 部材の損傷制御が求められている。RC 部材の損傷制御方法の一つとして, 主筋とコンクリートの付着除去がある。滝口ら^{1), 2)}は, 主筋とコンクリート間の付着を完全に除去した RC 部材においては, 斜めひび割れは大きくなりやすく, 急激に破壊することはないと報告している。真田ら³⁾は, ヒンジ位置から一定区間の主筋の付着除去を施した RC 梁部材においては, ヒンジ位置に損傷が集中してひび割れ本数が減少することを報告している。また, 近年では, RC 柱梁接合部の損傷抑制方法として, ヒンジリロケーション (以下, HR) 技術が注目されている。HR とは RC 梁の塑性ヒンジ位置を従来の柱際から意図的に離す方法である。その HR 技術は 1970 年代頃から Paulay ら⁴⁾が行った研究が始まりとされ, 近年, 日本においても様々な HR 手法を用いた研究^{5) ~ 8)}などが進められ, その損傷制御の有効性が示されている。筆者らは, RC 造の梁, および柱梁接合部の損傷制御を目的に, ヒンジリロケーション RC 梁 (以下, ヒンジ位置保証型 RC 梁) において梁四隅の主筋の付着除去を施した試験体の構造実験を行った⁹⁾。また, RC 骨組の損傷制御およびエネルギー吸収性能確保を実現するため, 梁主筋の付着除去を施した座屈拘束ブレース付きヒンジ位置保証型 RC 骨組の研究¹⁰⁾も進めている。

既報⁹⁾ではヒンジ位置保証型 RC 梁において, 四隅のみの主筋の付着を除去しても, 部材の復元力特性や, エネルギー吸収量などに悪影響は及ぼさないことが分かった。また, 梁の四隅のみの主筋の付着除去は, 想定したヒンジ位置である付着除去区間端部に変形やひび割

れを集中させ, 付着除去区間内の損傷を制御できた。本報では既報⁹⁾で実施した実験を再現する 3 次元有限要素解析を行い, 実験結果との比較から解析モデルの有効性を示す。また, そのモデルを基に付着除去を施す主筋, 区間の違いがヒンジ位置保証型 RC 梁の力学挙動に与える影響について検討する。

2. 解析対象とする実験の概要

2.1 試験体

解析対象とした試験体の詳細を図 1 に, 試験体諸元を表 1 に, 鉄筋の材料特性を表 2 に, コンクリートの材料特性を表 3 に示す。

試験体は試設計された超高層 RC 造建築物の低層階の梁を約 1/2 スケールに縮小し, スパン中央を反曲点位置として切り出した片持ち梁とした。筆者ら⁶⁾が過去に行ったヒンジ位置保証型 RC 梁の研究で用いた試験体と同一の断面, 配筋とした。梁の断面は 275×450mm, スタブ上面から加力点までの距離は 1800mm とした。また, 柱面から 550mm の位置をヒンジ位置と想定し, そこまでの区間の主筋を 2 段配筋の 4+4-D19 とし, その先は 2 段筋をカットオフして機械式定着し, 4-D19 とすることでヒンジ位置の保証を図っている。

試験体は計 3 体であり, 全ての主筋の全区間に対して付着除去を施さない通常の RC 梁と同様の付着がある B 試験体, 2 段筋カットオフ位置より 1D (D: 梁せい (450mm)) までの区間の梁四隅の主筋に対し付着除去を施した DB-1D 試験体, 2 段筋カットオフ位置から反曲点位置までの区間 (1250mm) の梁四隅の主筋に対し付着除去を施した DB-all 試験体とした。付着除去の方法は, 主筋をシース管に通

¹⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 助教・博士 (工学)
(〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

²⁾ 元 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 修士学生・修士 (工学)

³⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学系 教授・工博

⁴⁾ 熊谷組技術本部

¹⁾ Assistant Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, Dr.Eng.

²⁾ Former Graduate Student, Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, M.Eng.

³⁾ Prof., Dept. of Arch. and Build. Eng., Tokyo Tech, Dr.Eng.

⁴⁾ Technical Division, Kumagai Gumi Co., Ltd.

して、シー菅端部を自己融着テープで塞ぐことで行った。
試験体の詳細や設計概念は既報⁹⁾を参照されたい。

2.2 載荷

セットアップを図 2 に示す。実験では試験体のスタブを反力床に固定し、梁自由端に接続したアクチュエータにより加力を行った。加力点高さの水平変位Δをせん断スパン（1800mm）で除すことで求めた部材角 R に基づく、変位制御として加力した。加力サイクルは部

材角 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33\text{rad}$ までを 2 サイクルずつ、 $R=1/25\text{rad}$ を 1 サイクルの正負交番漸増繰り返し載荷を行った後、 $R=1/18\text{rad}$ の正加力を 1 度行い、除荷して終了とした。

3. 有限要素解析の概要

3.1 解析モデルとパラメータ

解析モデルを図 3 に、解析パラメータの概要を図 4 に示す。解析には汎用有限要素法プログラム“FINAL”¹¹⁾を用いた。前章に述べた既報⁹⁾の実験試験体を対象とした。解析モデルでは、形状および載荷の対称性を利用して、試験体の半分をモデル化した。コンクリート、鋼板、機械式定着具はソリッド要素、鉄筋はトラス要素でモデル化し

図 1 試験体詳細（単位：mm）⁹⁾

表 1 試験体諸元 ⁹⁾					
試験体名			B	DB-1D	DB-all
梁	$b \times D$ [mm]		275×450		
	F_c [N/mm ²]		50		
	端部主筋		4+4-D19 (SD490)		
	中央部主筋		4-D19 (SD490)		
	あばら筋	端部	4-D6@100 (USD685)		
		中央部	4-D6@150 (USD685)		
	付着除去区間の長さ [mm]		-	450 (1D)	1250 (all)
スタブ	$b \times D$ [mm]		700×450		
	F_c [N/mm ²]		50		
	主筋		14-D19 (SD490)		
	せん断補強筋		6-D6@100 (USD685)		

(b : 幅, D : せい, F_c : コンクリートの設計基準強度)

表 2 鉄筋の材料特性 ⁹⁾			
	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	E_s [N/mm ²]
D19 (SD490)	554	744	192000
D6 (USD685)	736*	901	212000

(σ_y : 降伏強度, σ_u : 引張強度, E_s : 鉄筋のヤング係数)
*0.2%オフセット耐力

表 3 コンクリートの材料特性 ⁹⁾			
	σ_B [N/mm ²]	σ_T [N/mm ²]	E_c [N/mm ²]
B	60.7	4.1	33800
DB-1D	61.9	4.0	33900
DB-all	63.3	3.9	34000

(σ_B : 圧縮強度, σ_T : 割裂強度, E_c : コンクリートのヤング係数 (σ_c - ϵ_c 関係で σ_B の 1/3 における割線剛性))

図 2 セットアップ（単位：mm）⁹⁾

(a) コンクリート

(b) 鋼材

図3 解析モデル

(a) DB-exte モデル

(b) DB-all-A1 モデル

(c) 梁断面詳細

※黄色部分が付着除去区間

図4 解析パラメータ (単位: mm)

た。機械式定着具は、支圧面および小口面を実験で使用した機械式定着具と同等の支圧面積を有する直方体に置換してモデル化した。また、梁主筋-コンクリート間、および機械式定着具の支圧面、小口面-コンクリート間にはそれぞれ接合要素を挿入し、付着特性を考慮した。その他の鉄筋-コンクリート間、鋼板-コンクリート間の付着すべりは考慮せず、完全付着とした。

付着除去を施す主筋、区間の違いによる影響を把握するため、それらを解析パラメータとした。四隅の主筋のヒンジ想定位置よりモーメントが小さい側の付着除去区間をパラメータとした実験試験体3体をモデル化した3モデル(B, DB-1D, DB-allモデル)に加え、四隅の主筋においてスタブ際(以下、「柱際」と定義)から加力点位置まで付着除去を施したDB-exteモデル(図4(a)),全ての1段筋においてヒンジ想定位置から加力点位置まで付着除去を施したDB-all-A1モデル(図4(b))の2モデルを作製し、計5モデルとした。

3.2 材料構成則

【コンクリート】

コンクリートの主応力度-等価一軸ひずみ関係を図5に示す。引張側はひび割れまで線形を仮定し、ひび割れ後は出雲らのモデル¹²⁾によりテンションスティフニングを考慮した。圧縮側は最大強度まで修正 Ahmad モデル¹³⁾を用い、最大強度後は Nakamura-Higai モデル¹⁴⁾を用いた。3軸応力下の破壊条件には Ottosen の4パラメータモデル(畑中らの係数)¹³⁾を用いた。ひび割れ後の圧縮劣化特性には

図5 コンクリートの主応力度-等価一軸ひずみ関係

図6 鋼材の応力度-ひずみ関係 図7 付着応力度-すべり関係

図8 境界条件・載荷

長沼の提案式¹⁵⁾を用いた。ひび割れ後のせん断伝達特性には Al-Mahaidi モデル¹⁶⁾を用いた。

【鋼材】

鋼材の応力度－ひずみ関係を図6に示す。鉄筋、鋼板、機械式定着具の応力度－ひずみ関係はそれぞれの材料特性に基づきバイリニア型にモデル化し、降伏後の剛性 E_{s2} は弾性剛性 E_{s1} の 1/100 倍とした。

【付着すべり、接合要素の特性】

梁主筋－コンクリート間の付着応力度－すべり関係を図7に示す。付着がある部分の梁主筋－コンクリート間の付着特性には、Naganuma らのモデル¹⁷⁾を用いた。付着強度 τ_0 は日本建築学会の靱性指針¹⁸⁾に基づき、付着強度時すべり量 S_u は文献19)に基づき算出した。付着除去を施した部分は、付着応力度－すべり関係において、 τ_0 、 S_u ともに十分に小さい値 ($\tau_0=1.0 \times 10^{-4} \text{N/mm}^2$, $S_u=1.0 \times 10^{-4} \text{mm}$) に設定することで、主筋とコンクリート間において付着応力度が作用しないようにモデル化した。

機械式定着具の支圧面、小口面－コンクリート間の接合要素の特性については、せん断方向には主筋の付着除去区間と同様に付着応力度が作用しないようにモデル化した。垂直方向の圧縮側には十分な剛性を与え、引張側には応力度を伝達しないように設定した。

3.3 境界条件・载荷

境界条件・载荷の詳細を図8に示す。試験体の半分をモデル化しているため、切断面の全節点の Y 方向変位を拘束した。また、スタ

ブ底面が固定支持となるよう、スタブ底面の全節点の X, Y, Z 方向変位を拘束し、X 軸周りの回転は自由とした。

载荷は梁の加力位置の上縁、下縁の外側に载荷板をモデル化し、その载荷板の加力位置列の節点に強制変位 Δ を与えた。部材角 R ($=\Delta/1800 \text{mm}$) で変位制御とし、 $R=1/800, 1/400, 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33 \text{rad}$ で 1 サイクルずつ载荷した。解析で 1 サイクルずつとしたのは大変形域まで安定した解析を行うためである。

4. 有限要素解析の結果と考察

4.1 せん断力 Q －部材角 R 関係

解析を行った 5 モデルのせん断力 Q －部材角 R 関係の解析結果を図9(a)～(e)に示す。実験試験体を再現した 3 モデルには実験結果も併せて示す。また、5 モデルの解析結果の Q － R 関係包絡線の比較を図9(f)に示す。なお、DB-all-A1 モデルは安定して解析できた $R=1/150 \text{rad}$ までの結果を示している。実験試験体を再現した 3 モデ

図10 梁主筋における外側と内側の定義

図9 せん断力 Q －部材角 R 関係

図11 梁1段筋外側のひずみ分布

図 12 5モデルの梁1段筋のひずみ分布の比較

ルはいずれも、大変形域での除荷剛性の解析結果と実験結果の対応は良好ではないものの、包絡線は概ね対応している。コンクリートのひび割れ後から主筋の降伏までの剛性（以下、2次剛性）の大きさは、ヒンジ想定位置よりモーメントが小さい側における付着除去区間の大きさに対応しており、B、DB-1D、DB-allと付着除去区間が大きくなるにしたがって小さくなった。また、DB-exteとDB-allの2次剛性は同等であり、DB-all-A1が最も2次剛性が小さくなっている。これは、ヒンジ想定位置よりモーメントが小さい側における付着除去区間が大きいほど、曲げ変形が集中するヒンジ想定位置付近において、付着除去を施した主筋のひずみが引張側、圧縮側ともに小さくなり、主筋が負担する応力が小さくなったためと考えられる。

4.2 主筋のひずみ分布

ここでは、RC梁断面において、図10に示すように外側と内側の主筋のひずみ分布の違いに着目して考察する。 $R=1/200$, $1/100\text{rad}$ 時における梁1段筋外側のひずみ分布の解析結果を実験結果と併せて図11に示す。実験試験体を再現した3モデルは解析と実験は概ね対応している。また、付着除去区間のひずみは一樣に分布しており、解析において付着除去を適切に行えていることが確認できる。

$R=1/100\text{rad}$ 時における梁1段筋（外側、内側）のひずみ分布について、5モデルの比較を図12に示す。外側については、ヒンジ想定位置付近におけるひずみは、引張側、圧縮側ともに付着除去区間が大きい試験体ほど小さくなっている。一方、DB-exteはDB-allと差異がない。これは、柱際からヒンジ想定位置までの2段配筋区間において付着がある場合でも、ひび割れ発生により付着劣化するため、この区間における付着除去の有無が主筋のひずみに与える影響はほとんど

主筋の付着状況（上側の主筋の図中） —●—：付着あり， —●—：付着除去

コンクリートの状況（解析結果の図中） ■：圧縮軟化要素， ■：圧縮軟化経験要素

図 13 ひび割れ状況

ないためと考えられる。内側については、外側のみに付着除去を施した DB-ID, DB-all, DB-exte ではヒンジ想定位置において引張側主筋が降伏しており、付着がある内側主筋のヒンジ想定位置に応力が集中したことが分かる。

4.3 ひび割れ状況

$R=1/100\text{rad}$ 時における梁側面のひび割れ状況を図 13 に示す。実験試験体を再現した 3 モデルのひび割れ発生箇所はいずれも解析と実験は概ね対応している。四隅のみに加力点位置まで付着除去を施した DB-all と DB-exte の損傷状況に差異はなく、DB-all-A1 同様に、付着除去を施したヒンジ想定位置よりモーメントの小さい側におけるひび割れを広範囲にわたって抑制できている。

以上のことから、全ての 1 段筋ではなく、四隅の主筋のみにヒンジ想定位置から加力点位置まで付着除去を施すことで、せん断力一部材角関係において 2 次剛性をほとんど低下させることなくひび割れを広範囲にわたって抑制できることが分かった。

5. 結

本報では、主筋の付着除去を施したヒンジ位置保証型 RC 梁の有限要素解析を行い、付着除去を施す主筋、区間の違いが力学挙動に与える影響を検討した。得られた結論を以下にまとめる。

- 1) 作製した解析モデルは、せん断力一部材角関係、主筋のひずみ分布、ひび割れ状況の実験結果を概ね再現できた。
- 2) 付着除去を施す主筋、区間をパラメータとした解析から、柱際からヒンジ想定位置までの区間における付着の有無はせん断力一部材角関係やひび割れ状況に影響を及ぼさないことが分かった。
- 3) 全ての 1 段筋ではなく、四隅の主筋のみにヒンジ想定位置から加力点位置まで付着除去を施すことで、せん断力一部材角関係において 2 次剛性をほとんど低下させることなくひび割れを広範囲にわたって抑制できることが分かった。

本報で対象とした片持ち形式の梁では、スパン中央部の境界条件が実構造物とは異なるため、今後も実験と解析により検討を重ねる。

謝辞

本研究成果の一部は、JST 産学共創プラットフォーム共同研究推進プログラム (JPMJOP1723) によるものです。

参考文献

- 1) Takiguchi K., Okada K., Sakai M.: Deforming Characteristics of RC Members with and without Bond, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.249, pp.1-11, 1976.11 (in Japanese)
滝口克己, 岡田謙二, 堺政博: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性, 日本建築学会論文報告集, 第 249 号, pp.1-11, 1976.11
- 2) Takiguchi K.: Deforming Characteristics of RC Members with and without Bond, II, Transactions of the Architectural Institute of Japan, No.262, pp.53-59, 1977.12 (in Japanese)
滝口克己: 付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性・II, 日本建築学会論文報告集, 第 262 号, pp.53-59, 1977.12
- 3) 真田暁子, 丸田誠: 部分的に主筋の付着を切った RC 梁・RC 有孔梁に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.187-192, 2007
- 4) T. Paulay et al.: Shear Effect on Plastic Hinges of Earthquake Resisting Reinforced Concrete Frames, Bulletin D'information 132, Committee Euro Inter, du Beton, 1979.4

- 5) 石川裕次, 平林聖尊, 川野翔平, 麻生直木, 中根一臣: 鉄筋コンクリート造ヒンジリロケーション接合部の耐震性能, 構造工学論文集, Vol.61B, pp.59-69, 2015.3
- 6) Maida Y., Kishiki S., Qu Z., Maegawa T., Hamada M., Sakata H.: Structural Behavior of Damage Position Guaranteed RC Beams with BRB Connections, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.82, No.737, pp.1091-1101, 2017.7 (in Japanese)
毎田悠承, 吉敷祥一, 曲哲, 前川利雄, 濱田真, 坂田弘安: 座屈拘束ブレース接合部を有する損傷位置保証型 RC 梁の力学挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第 82 巻, 第 737 号, pp.1091-1101, 2017.7
- 7) 太田行孝, 竹中啓之, 和泉信之: Y 字筋を用いた梁端ヒンジリロケーション RC 造梁に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.65B, pp.365-373, 2019.3
- 8) 小寺直幸, 金川基, 志村翔一, 丸田誠: 梁端部を高強度鉄筋で補強したヒンジリロケーション梁に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.205-210, 2019
- 9) Maida Y., Masuda K., Sato Y., Sakata H., Maegawa T., Hattori T.: The Effects of De-bond of Longitudinal Rebars on Structural Behavior of RC Beam with a Guaranteed Hinge Position, AIJ Journal of Technology and Design, Vol.27, No.65, pp.231-236, 2021.2 (in Japanese)
毎田悠承, 益田一毅, 佐藤裕貴, 坂田弘安, 前川利雄, 服部翼: ヒンジ位置保証型 RC 梁の力学挙動に主筋の付着除去が与える影響, 日本建築学会技術報告集, 第 27 巻, 第 65 号, pp.231-236, 2021.2
- 10) Maida Y., Sato Y., Sakata H., Maegawa T., Hattori T.: The Effects of The De-bonding of Beam Longitudinal Rebars on The Structural Behavior of Buckling Restrained Braced RC Frames with A Guaranteed Hinge Position, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.86, No.783, pp.815-826, 2021.5 (in Japanese)
毎田悠承, 佐藤裕貴, 坂田弘安, 前川利雄, 服部翼: 座屈拘束ブレース付きヒンジ位置保証型 RC 骨組の力学挙動に梁主筋の付着除去が与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 86 巻, 第 783 号, pp.815-826, 2021.5
- 11) 伊藤忠テクノソリューションズ (株): FINAL HELP, 2018.5
- 12) 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
- 13) Naganuma K.: Stress-Strain Relationship for Concrete under Tri-axial Compression, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.474, pp.163-170, 1995.8 (in Japanese)
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
- 14) Nakamura H., Higai T.: 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, 1999.10
- 15) Naganuma K.: Nonlinear Analytical Model for Reinforced Concrete Panels under In-Plane Stresses, Study on nonlinear analytical method for reinforced concrete wall structures Part 1, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No.421, pp.39-48, 1991.3 (in Japanese)
長沼一洋: 平面応力場における鉄筋コンクリート板の非線形解析モデル 鉄筋コンクリート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.39-48, 1991.3
- 16) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep.of Structural Engineering, Cornell Univ., 1979.1
- 17) Naganuma K., Yonezawa K., Kurimoto O., Eto H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, Proc. of 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, 2004.8
- 18) 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
- 19) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987.2

[2021 年 1 月 27 日原稿受理 2021 年 3 月 26 日採用決定]